



PROJETO DE GRADUAÇÃO

FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE ALUMÍNIO LIGA (CAL-900) PARA DIFERENTES NÍVEIS DE H/W

Por,
Juliano França de Paula Alves
Ícaro José Ladeira Napoleão de Souza

Brasília, 11 de julho de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**FADIGA DE CABOS CONDUTORES DE
ALUMÍNIO LIGA (CAL-900) PARA DIFERENTES
NÍVEIS DE H/W**

POR,

**Juliano França de Paula Alves
Ícaro José Ladeira Napoleão de Souza**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. José Alexander de Araújo, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM

Prof. Aida Alves Fadel, UnB/ ENM

Brasília, 11 de Junho de 2016

Dedicatórias

Á minha mãe Maria Auxiliadora França de Paula, por ser capaz de dar tudo sem receber nada e por sempre fazer o possível e o impossível para me ajudar.

Juliano França de Paula Alves

Dedico este projeto ao Universo, por ser um lugar tão interessante.

Ícaro J. L Napoleão de Souza

Agradecimentos

Aos meus pais, meus irmãos e minha tia Margarida, por terem feito a diferença na formação da minha personalidade; uma eterna gratidão aos meus grandes amigos Eugésio Maciel, Daniel Pina, Alan Borges, Hugo Vilela, Thiago Cunha, Leandro Aguiar e Elson Ximenes por me ajudarem a vencer os obstáculos da vida; aos meus colegas de curso Marcelo Gasperazzo, Ícaro Ladeira, Rodrigo Roque, Gabriel Kabir, Jean Michel, Thiago Schmidt, Lucas Castro e Luiz Carneiro, que além de estarem inclusos no agradecimento acima, me presentearam com o prazer da companhia deles nos últimos cinco anos de noites em claro dedicadas ao curso; Aos meus companheiros do laboratório de cabos que sempre me ampararam no decorrer desse trabalho e por último ao meu orientador José Alexander de Araújo pela confiança e comprometimento no desenvolvimento desse projeto e consequentemente no meu crescimento acadêmico.

Juliano França de Paula Alves

Agradeço à minha família, fundação do meu ser; aos meus queridos amigos, sempre presentes ao longo do caminho, aos meus colegas de noites viradas no Bloco G, com quem eu aprendo todos os dias, aos colegas do LabCabo pelos auxílios sempre cordiais e ao orientador professor José Alexander de Araújo, pela disponibilidade e interesse em compartilhar o conhecimento.

Ícaro J. L. Napoleão de Souza

Este estudo tem caráter experimental e compreende uma avaliação da influência da carga de esticamento sobre a vida útil de condutores aéreos do tipo alumínio liga CAL 900, com foco no critério de projeto H/w , onde H é carga de tração horizontal e w é o peso por unidade de comprimento do condutor. Foi realizado um levantamento de duas curvas S-N do condutor para os valores de H/w de 1820 e 2144m, totalizando 18 ensaios de fadiga, 9 para cada curva. A fórmula de Poffenberger-Swart, uma expressão numérico-empírica que correlaciona o nível de tensão nominal na região de falha à amplitude de vibração do cabo, é utilizada para o cálculo das tensões nominais atuantes no condutor. Adicionalmente, são obtidos dados de extensometria para comparação com as tensões calculadas. Na primeira etapa do projeto, foi realizada a revisão teórica, uma descrição detalhada dos procedimentos de ensaio e da bancada experimental e foi definida a metodologia dos ensaios. Na segunda etapa são apresentados e avaliados os resultados obtidos experimentalmente com o cabo CAL 900. Os resultados da extensometria validam a confiabilidade do modelo de Poffenberger-Swart para o cálculo das amplitudes de deslocamento, apresentando erro máximo de 10%. O levantamento das curvas S-N demonstrou que a vida média varia de forma similar com a alteração da amplitude de deslocamento para ambos os valores de H/w . Além disso, o aumento da carga de esticamento acarretou redução de no máximo 12% na vida do condutor para os maiores níveis de tensão alternada aplicados. A comparação das curvas S-N com a Curva Limite de Segurança da *CIGRE* (CSBL) demonstram uma resistência a fadiga do CAL 900 consideravelmente baixa, o que leva a uma investigação preliminar sobre as possíveis causas deste comportamento. Uma comparação com resultados coletados da literatura para os cabos Ibis e Tern demonstra uma possível influência da folga cabo-grampo de suspensão na vida do condutor. Adicionalmente, observa-se que para um mesmo H/w , as curvas S-N desses condutores diferem consideravelmente, contrariando a teoria do parâmetro. Por fim, uma investigação comparativa de ensaios realizados anteriormente para o CAL 900 no LabCabos/UnB apresentou uma discrepância considerável na durabilidade, o que pode indicar a má qualidade da amostra deste estudo.

ABSTRACT

This study is experimental and includes an analysis of the influence the initial tensile load on the life of aluminum alloy overhead conductors (CAL 900), with focus on the H/w design parameter, where H is the horizontal tensile load and w is the weight per length unit of the conductor. An assessment of the conductor S-N curves for different values of H/w is performed, totalizing 18 fatigue tests, 9 for each of the S-N curves. The Poffenberger-Swart formula, which is an analytical-experimental expression that correlates the nominal tension on the conductor failure region to the vibration displacement, is used to calculate the tensions acting on the cable. Additionally, extensometry data for the contact area cable/suspension clamp is obtained to validate the calculated tensions. The first stage of the project presents a theoretical review, a detailed description of the experimental procedure and the test facilities and it was defined the testing methodology. The results of the extensometry validate the reliability of Poffenberger-Swart model for calculating the displacement amplitudes, with a maximum error of 10%. The S-N curves obtained showed that the average life varies similarly with the change of displacement amplitude for both H/w values. Moreover, the increased tensile load caused a reduction of up to 12% in the conductor's life for the greatest levels of stress amplitude applied. The comparison of S-N curves with the CIGRE Safety Border Line (CSBL) shows a fatigue resistance considerably low for the CAL 900, which leads to a preliminary investigation into the possible causes of this behavior. A comparison with results collected from the literature for the Ibis and Tern cables presented a possible influence of the suspension clamp in the life of the conductor. Additionally, it is observed that for the same H/w , the S-N curves of these conductors differ considerably, contrary to the parameter theory. Finally, a comparative research carried out previously for the CAL 900 in the LabCabos/UNB facilities showed a significant discrepancy in durability, which may indicate the poor quality of our sample.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTO	1
1.2	MOTIVAÇÃO	2
1.3	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	2
1.4	OBJETIVO	3
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REVISÃO TEÓRICA	5
2.1	FADIGA	5
2.1.1	O Mecanismo de Fadiga	5
2.1.2	Ciclos de Carregamento	8
2.1.3	O Método S-N para Previsão de Vida à Fadiga	10
2.1.4	A Influência da Tensão Média na Resistência à Fadiga	12
2.2	FADIGA EM CABOS CONDUTORES	15
2.2.1	Excitação Eólica	15
2.2.2	O Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores	17
2.2.3	A Fórmula de Poffenberger-Swart	18
2.2.4	Metodologias de Estimativa de Vida em Fadiga em Cabos Condutores	20
2.2.5	O Parâmetro H/w	23
2.3	EXTENSOMETRIA	26
2.3.1	Princípio de Funcionamento dos Extensômetros	27
2.3.2	Tipos de Extensômetros	29
2.3.3	Especificações Usuais dos Extensômetros	29
2.3.4	Extensometria nos Cabos Condutores de Energia	30
2.3.5	Ponte de Wheatstone	31
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	34
3.1	DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	34
3.1.1	Blocos Fixos e Móveis	35
3.1.2	Mesa para Fixação do Grampo de Suspensão	37
3.1.3	Mecanismo de Vibração (<i>Shaker</i>)	38
3.1.4	Dispositivo de Tracionamento do Cabo e Roldana	38
3.1.5	Dispositivo de Detecção de Quebra de Fios	39
3.1.6	Sistema de Aquisição de Dados e Controle da Bancada	40
3.2	CORPOS DE PROVA	41
3.2.1	Cabo Condutor – CAL 900	42
3.2.2	Grampo de Suspensão	43
3.2.3	Grampo de Ancoragem	44
3.2.4	Extensômetros	45
3.3	METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA S-N	46
3.3.1	Metodologia	46
3.3.2	Procedimento Experimental	48
3.4	METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA FÓRMULA P-S	55
3.4.1	Metodologia	55
3.4.2	Procedimento Experimental	56
4	RESULTADOS E ANÁLISE	61
4.1	Extensometria	61
4.1.1	Ensaio Dinâmico para H/w de 1820m	61
4.1.2	Ensaio Dinâmico para H/w de 2144m	62
4.2	Curvas S-N	64
4.2.1	Comparação com a CSBL	66

5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXOS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Etapas e aspectos macroscópicos da superfície em um processo de falha por fadiga.....	6
Figura 2.2. Processo de nucleação da trinca e formação de intrusão na superfície do material.....	7
Figura 2.3. Processo de propagação da trinca em dois estágios (Klesnil e Lukás, 1992).....	7
Figura 2.4. Fratura por fadiga com marcas de praia.....	8
Figura 2.5. Amplitude de tensão constante alternada e flutuante (Branco et al, 1986 – adaptado).....	8
Figura 2.6. Ciclo de carregamento aleatório (Garcia <i>et al</i> , 2000 - adaptado).....	9
Figura 2.7. Parâmetros de um ciclo de carregamento com amplitude de tensão constante (Fadel, 2010).....	9
Figura 2.8. Curva S-N esquemática para um aço maciço e uma liga de alumínio (Branco, 1986).....	11
Figura 2.9. Diagrama S-N do alumínio 7075-T6 em diferentes faixas de tensão média (Dowling, 1999 - modificado).....	12
Figura 2.10. Diagrama de vida constante do alumínio 7075-T6 (Dowling, 1999 - modificado).....	13
Figura 2.11. Diagrama esquemático mostrando as curvas para critério de fadiga apresentado.....	14
Figura 2.12. Esquemático da oscilação do cabo sob ação do vento.....	16
Figura 2.13. Variação do auto-amortecimento F com a tração de esticamento do condutor (Fuchs <i>et al</i> , 1992).....	17
Figura 2.14. Condutor AAC em detalhe e regiões de contato.....	18
Figura 2.15. Ruptura de fios por fadiga e marcas elípticas de <i>fretting</i> (Bellorio, 2009).....	18
Figura 2.16. Localização da tensão calculada por P-S (Fadel, 2010).....	19
Figura 2.17. Curva Safety Border Line em comparação com algumas curvas S-N experimentais (CIGRE, 2003).....	22
Figura 2.18. H/w em função da área transversal relativa do condutor para diferentes valores de temperatura (Barret & Motils, 2001).....	26
Figura 2.19. Extensômetro de Resistência elétrica (Doca, 2006).....	27
Figura 2.20. Deformação de um fio com carga de tração (Andolfato, 2004).....	27
Figura 2.21. a) Unidirecional; b) Roseta Tripla 120 graus; c) Diafragma (pressão); d) Tensão Interna; e) Unidirecional Longo (concreto); (Doca, 2006).....	29
Figura 2.22. Extensômetros da <i>Kyowa</i> (Andolfato, 2004).....	29
Figura 2.23. Extensômetros da <i>MicroMeasurements</i> (Andolfato, 2004).....	30
Figura 2.24. Esquema de posicionamento do extensômetro no ponto de máxima tensão.....	30
Figura 2.25. Representação da Ponte de Wheatstone (Andolfato, 2004).....	31
Figura 2.26. Medidas de deformações a 14 de ponte (Andolfato, 2004).....	31
Figura 2.27. Correntes na Ponte de Wheatstone (Andolfato, 2004).....	32
Figura 2.28. Tipos de associações de Extensômetros (Doca, 2006).....	33
Figura 3.1. Configuração das bancadas de ensaio A e B (Fadel, 2010).....	34
Figura 3.2. Pontos de distribuição de ar refrigerado no LabCabos.....	35
Figura 3.3. Bloco Fixo 1 da bancada A.....	35
Figura 3.4. Bloco Fixo 2.....	36
Figura 3.5. Bloco Fixo 3.....	36
Figura 3.6. Bloco Móvel.....	37
Figura 3.7. a) Mesa para Fixação do Grampo de Suspensão, b) Ângulo de mergulho.....	37
Figura 3.8. <i>Shaker</i> utilizado no LabCabos.....	38

Figura 3.9. Alavancas das três bancadas de ensaio.	38
Figura 3.10. Visores das Células de Carga.	39
Figura 3.11. Roldana.	39
Figura 3.12. a) Dispositivo de detecção de quebras de fio, b) Simulação do movimento da régua.	40
Figura 3.13. a) Aquisitor da bancada A, b) Aquisitor da bancada B, c) Aquisitor da bancada C.	41
Figura 3.14. a) Foto da seção transversal do cabo CAL 900, b) Desenho esquemático da seção do condutor CAL 900.	42
Figura 3.15. Deformação Longitudinal do fio CAL 900.	43
Figura 3.16. Vista explodida do Grampo de Suspensão Forjasul.	44
Figura 3.17. Grampo de Ancoragem.	45
Figura 3.18. Codificação dos extensômetros da Excel Sensores.	45
Figura 3.19. Posicionamento das polias.	48
Figura 3.20. Bobina do cabo CAL-900.	49
Figura 3.21. a) Pano de couro, b) Lona de borracha para proteção.	49
Figura 3.22. Grampo de suspensão posicionado sem as porcas.	50
Figura 3.23. a) Célula de Carga, b) Tirfor conectado ao Grampo de Ancoragem.	50
Figura 3.24. Mesa, acelerômetro e braçadeira.	51
Figura 3.25. Posição do acelerômetro a 89 mm do UPC.	52
Figura 3.26. a) Sensor de distância, b) Fita isolante no ponto do foco.	52
Figura 3.27. Posição da régua de detecção de quebras.	53
Figura 3.28. Amplificador.	53
Figura 3.29. Processo de serragem do cabo.	55
Figura 3.30. Processo de lixamento.	57
Figura 3.31. a) Álcool isopropílico, b) Limpeza da superfície com álcool e cotonete.	57
Figura 3.32. Verificação da resistência do extensômetro.	58
Figura 3.33. Local da colagem do extensômetro.	58
Figura 3.34. Posicionamento do extensômetro na fita adesiva.	59
Figura 3.35. Aplicação de cola no local de colagem do extensômetro.	59
Figura 3.36. Colagem do extensômetro.	59
Figura 3.37. Extensômetros conectados no aquisitor de dados.	60
Figura 4.1. Tensão versus amplitude de deslocamento para H/w de 1820.	62
Figura 4.2. Tensão versus amplitude de deslocamento para H/w de 2144m.	63
Figura 4.3. Tensão versus Amplitude de Deslocamento referente aos três H/w	64
Figura 4.4. Curva S-N para H/w de 1820m e 2144m.	65
Figura 4.5. Curva S-N para os dois H/w	66
Figura 4.6. Curva S-N para H/w de 1820m, 2144m e a CSBL.	66
Figura 4.7. Normalização para o CAL 900 com H/w de 1820 e 2144.	67
Figura 4.8. Comparação Ibis, Tern, CAL 900 para um H/w de 1820m.	68
Figura 4.9. Comparação entre o CAL 900 utilizado neste estudo e a amostra de Araújo <i>et al</i> (2013).	69
Figura A.5.1 Janela Inicial do software.	75
Figura A.5.2. Definição das unidades.	75
Figura A.5.3. Tabela de parâmetros do shaker.	76
Figura A.5.4. Janela global shaker parameters.	76
Figura A.5.5. Parâmetros do shaker.	76
Figura A.5.6. Channel.	77
Figura A.5.7. Serial number de um acelerômetro.	77

Figura A.5.8. Control.	77
Figura A.5.9. Profile.....	78
Figura A.5.10. Sweep.....	78
Figura A.5.11. Dwell.....	78
Figura A.5.12. Transmissibility.....	79
Figura A.5.13. Contents.	79
Figura B.5.14. Software AqDados.	79
Figura B.5.15. Configuração do driver de aquisição.....	80
Figura B.5.16. Comunicação entre hardware e software.	80
Figura B.5.17. Comunicação feita com sucesso.....	80
Figura B.5.18. Caracterização do modelo do ADS utilizado.	81
Figura B.5.19. Erro frequente na caracterização do modelo do hardware.	81
Figura B.5.20. Preparação do ensaio.....	81
Figura B.5.21. Configuração das entradas analógicas.	82
Figura B.5.22. Menu de informações.	82
Figura B.5.23. Configuração necessária para leitura dos extensômetros.....	82
Figura B.5.24. Configuração dos extensômetros.	83
Figura B.5.25. Planilha Excel com o calculo do Shunt para cada RCAL.....	83
Figura B.5.26. Caracterização do extensômetro e da faixa de leitura.	84
Figura B.5.27. Balanceamento.	84
Figura B.5.28. Calibração.	84
Figura B.5.29. Relatório da extensometria.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tipos de excitação eólica em condutores aéreos (EPRI,1979).	16
Tabela 2.2. Limites de resistência à fadiga segundo EPRI (1979).....	21
Tabela 2.3. Constantes da Curva Limite de Segurança (CIGRE, 2006).	23
Tabela 2.4. Intensidade de turbulência eólica para diferentes tipos de terreno (CIGRE, 2005).	24
Tabela 2.5. Limites do parâmetro H/w para cada categoria de terreno (CIGRE, 2005, adaptado).	24
Tabela 2.6. Fatores de Sensibilidade do extensômetro (Fadel, 2010).....	28
Tabela 3.1. Propriedades do CAL 900.	43
Tabela 3.2. Especificações do grampo de suspensão.	44
Tabela 3.3. Especificações do grampo de ancoragem.....	45
Tabela 3.4. Parâmetros adotados para os ensaios.....	48
Tabela 3.5. Parâmetros do ensaio dinâmico.	56
Tabela 4.1. Resultados do ensaio dinâmico para o H/w de 1820m.....	62
Tabela 4.2. Resultados do ensaio dinâmico para o H/w de 2144m.....	63
Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de fadiga para o CAL 900.	64
Tabela 4.4. Resultados dos ensaios de fadiga para o CAL 900.	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A_{al}	Área da seção transversal da parcela de alumínio no condutor	[mm ²]
A_s	Área da seção transversal da parcela de aço no condutor	[mm ²]
A_t	Área transversal de um dado fio	[m ²]
d_a	Diâmetro da camada externa	[mm]
d_{al}	Diâmetro dos fios de alumínio	[mm]
d_s	Diâmetro da camada interna	[mm]
E_a	Módulo de elasticidade da camada externa	[Mpa]
E_{al}	Módulo de elasticidade do alumínio	[Mpa]
E_s	Módulo de elasticidade da camada interna	[Mpa]
EI_{min}	Rigidez mínima à flexão do cabo	[N.mm ²]
F	Fator de auto-amortecimento	
K_s	Fator de sensibilidade do extensômetro	
n_a	Número de fios da camada externa	
n_{al}	Número de fios de alumínio	
N_f	Vida em ciclos	[ciclos]
n_s	Número de fios do núcleo	
R_t	Razão de tensão	
S_{al}	Tensão do alumínio	[Mpa]
S_s	Tensão do aço	[Mpa]
Y_b	Amplitude de deslocamento pico a pico	[mm]
ΔR	Variação da resistência elétrica	[Ω]
A	Razão de amplitudes	
b	Expoente de resistência à fadiga	
C	Constante do material	
D	Constante do material	
e	Diferença de potencial elétrica medido pelo galvanômetro	[V]
E	Fonte de tensão elétrica	[V]
EI	Rigidez à flexão do cabo	[N.mm ²]
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
H	Carga de tração horizontal	[N]
I	Corrente elétrica	[A]
K	Coeficiente de Poffenberger-Swart	[N/mm ³]
l	Comprimento de um dado fio condutor	[m]
p	Rigidez da montagem	[mm ⁻⁴]
R	Resistência elétrica	[Ω]
S	Tensão nominal	[Mpa]
T	Carga de esticamento	[N]
w	Peso por unidade do comprimento	[N/m]
x	Distância de 89 mm	[mm]

Símbolos Gregos

$\tilde{\sigma}_{fB}$	Tensão verdadeira de resistência à fadiga	[Mpa]
ρ_{al}	Massa específica do alumínio	[kg/mm ² /m]
ρ_s	Massa específica do aço	[kg/mm ² /m]
σ_a	Tensão alternada	[Mpa]
σ_{ar}	Limite de fadiga	[Mpa]
σ_f	Coeficiente de resistência à fadiga	[Mpa]
σ_{max}	Tensão máxima	[Mpa]

σ_{med}	Tensão média	[Mpa]
σ_{min}	Tensão mínima	[Mpa]
σ_{P-S}	Tensão de Poffenberger-Swart	[Mpa]
σ_u	Limite de resistência	[Mpa]
σ_y	Tensão limite de escoamento	[Mpa]
σ'_f	Coeficiente de resistência à fadiga	[Mpa]
$\Delta\sigma$	Variação de tensão	[Mpa]
$d\rho$	Variação da resistividade elétrica do fio	[Ωm]
ν	Coeficiente de Poisson do material	
ε	Deformação de um fio	[μstrain]
ρ	Resistividade do material do fio	[Ωm]
σ	Tensão	[Mpa]

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ACAR	Aluminium Conductor Alloy Reinforced.
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CA (AAC)	Cabos de Alumínio (All Aluminium Conductor).
CAL 900	Condutores de Alumínio Liga com bitola de 900 kcmil.
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Electriques.
CRT	Carga de Ruptura a Tração.
CSBL	CIGRE'S Safe Border Line.
EDS	Every Day Stress.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
EPRI	Electric Power Research Institute.
IACS	International Annealed Copper Standard.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
LabCabos	Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica na Universidade de Brasília.
P-S	Poffenberger e Swart.
UPC	Último Ponto de Contato entre o cabo e o grampo de suspensão.
UTS	Ultimate Tensile Stress.

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização do projeto, explicitando a motivação e o objetivo, a estruturação do trabalho e um estudo bibliográfico acerca do tema.

1.1 CONTEXTO

Uma matriz energética eficiente é fundamental para todos os setores da economia, do consumo residencial à indústria de base, e está intimamente relacionada ao crescimento econômico e desenvolvimento de um país. No Brasil, existe uma demanda crescente por energia. Conforme estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015), a demanda energética cresceu 3,1%, associada a um aumento de 0,1% do PIB em 2014. A oferta interna de energia elétrica atingiu um crescimento de 2,1% em relação a 2013, o que representa uma disponibilidade total de 624254 GWh em 2014 e coloca o Brasil como oitavo maior produtor de energia elétrica do mundo de acordo com o *BP Statistical Review of World Energy 2015*.

A matriz elétrica brasileira é baseada principalmente na geração hidroelétrica. Segundo a *Resenha Energética – Brasil 2015*, 63,8% da oferta de potência de geração elétrica no país é proveniente de fontes hidráulicas. As bacias hidrográficas brasileiras propiciam a instalação de usinas hidroelétricas de grande porte e capacidade de geração. No entanto, em geral, as fontes produtoras se concentram em locais afastados dos centros consumidores, o que cria a necessidade de uma rede de transmissão bastante extensa.

Em 2014, o sistema brasileiro de transmissão de energia elétrica atingiu uma extensão total de 125,7 mil km de linhas de transmissão (EPE, 2015), com uma expansão de 7,6% referente ao ano anterior. A dimensão da malha e a idade média avançada das linhas de transmissão, de 20 a 30 anos de operação (Henriques, 2006), criam uma necessidade de mecanismos eficientes de prevenção e controle de falhas.

A falha em uma linha de transmissão pode resultar em sérios prejuízos socioeconômicos. Pode-se citar, por exemplo, o evento ocorrido em 2001, quando a ruptura por fadiga de um cabo condutor de 460 kV no rio Paraná provocou um blecaute de grandes proporções nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, afetando cerca de 68 milhões de pessoas durante um período de aproximadamente 10 horas. Estima-se um prejuízo financeiro ao sistema de 70 milhões de reais somente devido à interrupção do fornecimento de energia pelo sistema (Henriques, 2006). Fica evidente assim, a importância do desenvolvimento de ferramentas preventivas que garantam a confiabilidade das linhas.

O elemento de maior importância no transporte de energia elétrica é o cabo condutor, que atua propriamente na transmissão de energia e tem um custo significativo, 25% do total de uma linha de

transmissão, segundo Henriques (2006). Nota-se que a grande maioria das falhas deste elemento está relacionada à fadiga mecânica causada por vibrações eólicas de alta frequência e baixa amplitude (CIGRE, 1979).

Entretanto, um desafio que as empresas do setor elétrico ainda enfrentam, é a insuficiência de dados relativos ao comportamento dinâmico de condutores aéreos, fato que demonstra a necessidade de pesquisas na área com a finalidade de viabilizar o projeto de linhas de transmissão mais confiáveis e a reopontencialização e manutenção de linhas mais antigas.

1.2 MOTIVAÇÃO

Considerando o contexto de importância econômica e social das linhas de transmissão de energia elétrica, fica clara a necessidade de desenvolvimento das tecnologias existentes e de novas soluções que garantam a segurança e viabilidade das linhas. O empreendimento de recursos para o entendimento do fenômeno de fadiga em cabos condutores possibilitará o desenvolvimento de novas metodologias de projeto, que tornem a instalação, operação e manutenção de linhas de transmissão mais confiáveis, com menor impacto econômico e até mesmo ambiental.

1.3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

O fenômeno de fadiga em cabos condutores vem sendo observado desde o início do século passado e foi analisado primeiramente por Stockbridge (1925). A partir da década de 50, surge um interesse crescente pelo tema. Em 1953, é criado o subcomitê SC6 da CIGRÈ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) para investigação das causas de falhas relacionadas a vibrações eólicas em linhas de transmissão. As conclusões do grupo, registradas no relatório 213, são publicadas em Zetterholm (1960), onde é definido o parâmetro de projeto EDS (*Every Day Stress*), que corresponde à maior carga de tração aplicável a um condutor para garantir uma vida infinita do mesmo. A EDS é dada como uma porcentagem da carga de ruptura à tração do condutor.

Em 1965, Poffenberg-Swart deduz uma fórmula empírico-analítica que correlaciona a tensão nominal na zona de falha do condutor, localizada no último ponto de contato (UPC) cabo/grampo de suspensão, à amplitude de vibração do mesmo determinada a 89 mm do UPC. Com base nesta fórmula, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), propõe em 1966, uma metodologia para projeto de linhas de transmissão. Esta metodologia, associada ao levantamento de curvas S-N, é ainda hoje, a mais empregada em projetos (Fadel, 2010).

No estudo realizado por Frickle e Rawlins, em 1968, através de ensaios experimentais, foi verificada a influência do desgaste por abrasão (*fretting*) na vida útil dos condutores. O *fretting* é um fator de aceleração do processo de fadiga, atuando na iniciação das trincas. O relatório da CIGRÈ (1979) apresenta recomendações para a avaliação da resistência à fadiga em condutores e compara o comportamento dos cabos sob efeito do *fretting* e na ausência do mesmo, concluindo que a vida útil reduz drasticamente com a presença de abrasão. Além disso, o trabalho recomenda um método

aperfeiçoado para determinação da vida de cabos condutores baseado na teoria de acúmulo de danos linear (Regra de Miner). O relatório da CIGRÈ (1985), afirma que as falhas dos cabos condutores ocorrem invariavelmente na região de contato cabo/grampo de suspensão, onde estão presentes os maiores níveis de tensão e *fretting*. Outros estudos de relevância relacionados ao processo de *fretting* em condutores foram realizados; como Preston *et al* (1986), que verificou que o *fretting* mais severo ocorre nos pontos de restrição de movimento e nas camadas intermediárias de fios do cabo; e Zhou *et al* (1995), onde é desenvolvido um aparato experimental para testes de fadiga dos fios.

Em 1978, Claren introduz um conceito inovador para a determinação da tensão de esticamento de condutores. O parâmetro H/w , onde H é a carga de tração horizontal e w é o peso por unidade de comprimento, diferentemente da EDS, leva em consideração as características de auto-amortecimento do condutor e o tamanho do vão livre. A CIGRÈ incorpora este conceito para projeto seguro de linhas de transmissão em um relatório de 1999, associando também ao parâmetro, características do terreno, como cobertura superficial. Barret e Motils (2001) avalia o conceito e apresenta uma crítica à utilização do conceito H/w .

São de grande importância para o presente estudo: o trabalho de Henriques (2006), onde foi desenvolvida, com base nas recomendações da CIGRÈ (1985), EPRI (1979) e IEEE (1978), a bancada de ensaios de fadiga em cabos condutores do Laboratório de Fadiga e Integridade de Cabos Condutores do ENM/UnB; e o trabalho de Fadel (2010), que apresenta resultados experimentais da influência da tensão de esticamento na vida em fadiga de cabos IBIS (CAA 397,5 MCM), realizando o levantamento das curvas S-N e avaliando a precisão da fórmula de Poffenberger-Swart. Observa-se no referido estudo, que a Curva Limite de Segurança da CIGRÈ (CSBL), empregada no projeto de linhas de transmissão, se mostra bastante conservadora.

1.4 OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo a análise dos efeitos da carga de tração no comportamento em fadiga e na vida útil de cabos condutores CAL 900, com base em experimentos realizados no Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica na Universidade de Brasília. O trabalho é focado no parâmetro H/w como critério de projeto. Foram levantadas curvas S-N (Curvas de Wöhler) para dois valores de H/w aplicados aos condutores de alumínio liga, possibilitando assim, uma análise da influência do parâmetro no fenômeno e a comparação com a CSBL. Além disso, é feita uma validação do modelo de Poffenberger-Swart para o cálculo das amplitudes de deslocamentos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é estruturado em um capítulo de introdução, e dois capítulos de desenvolvimento e um capítulo final de resultados e análises, além da conclusão. No presente capítulo estão descritos o

problema apresentado, o contexto e a motivação do projeto, os objetivos e uma revisão do estado da arte.

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica dos temas relevantes para o estudo, incluindo o mecanismo de fadiga, os ciclos de carregamento e a influência da tensão média na resistência à fadiga. É realizada também uma revisão sobre fadiga em cabos condutores, que inclui os mecanismos de falha e excitação eólica, a fórmula de Poffenberger-Swart, metodologias de estimativa de vida em fadiga em condutores e critérios de projeto, com ênfase no parâmetro H/w . Por fim, o capítulo discorre sobre a extensometria, uma ferramenta de grande importância no ensaio de cabos condutores.

O terceiro capítulo refere-se à metodologia experimental para ensaio de condutores, apresentando uma descrição detalhada da bancada de testes, do aparato experimental, e do procedimento de ensaio.

No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais. Uma discussão sobre a validade da equação de Poffenberger-Swart e sobre a influência do parâmetro H/w na durabilidade do condutor é realizada. Por fim, é apresentada uma conclusão sobre os resultados do trabalho.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo compreende a descrição do fenômeno de fadiga e seus aspectos fundamentais, focando principalmente no processo de fadiga em cabos condutores e no parâmetro H/w como critério de projeto de linhas de transmissão. Além disso, o capítulo discorre sobre a extensometria como ferramenta para ensaios de condutores aéreos.

2.1 FADIGA

A fadiga é um processo de degradação gradual de um componente mecânico sujeito a condições cíclicas de carregamento, e que pode eventualmente levar à ruptura do material devido à iniciação e propagação de trincas. De acordo com a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) na norma ASTM STD E1823 (1996): “Fadiga é um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre num material sujeito a condições que produzem, num ponto ou em vários pontos, tensões ou deformações dinâmicas, capazes de culminar em trincas ou numa fratura completa após um número suficiente de variações de carga”.

O comportamento de materiais sujeitos a esforços cíclicos foi observado de forma sistemática pela primeira vez por W. A. J. Albert em 1828. No entanto o termo fadiga foi utilizado apenas a partir de 1839 em um estudo de J. V. Poncelet. Em 1860, o engenheiro alemão August Wöhler, motivado por um fenômeno de falha recorrente em trilhos de trem, desenvolveu uma metodologia de ensaio de corpos de prova padronizados (Dowling, 1999). Os ensaios correlacionavam as tensões de carregamento ao número de ciclos necessários para a falha dos corpos de prova. Posteriormente, a representação gráfica dos resultados deste tipo de ensaio ficou conhecida como “Curva de Wöhler”. Este procedimento ainda é amplamente utilizado na determinação dos limites de fadiga de materiais.

No projeto de componentes mecânicos e estruturas envolvidas em carregamentos dinâmicos cíclicos a fadiga é um fator crítico. Em geral, falhas devido a carregamentos estáticos são mais facilmente previstas e evitadas, pois ocorre a deformação plástica do componente sobre carregamento antes que a tensão de ruptura do material seja alcançada e uma falha catastrófica ocorra, o que possibilita a troca ou reparo do componente. No entanto, a fadiga é um processo mais complexo, que frequentemente leva a falhas em tensões bem abaixo da resistência máxima do material (Davim, 2004), o que a torna um fator de extrema importância em projetos mecânicos.

2.1.1 O Mecanismo de Fadiga

O processo de fadiga está intimamente relacionado a deformações plásticas cíclicas. Para um determinado limite de resistência à fadiga, a amplitude das deformações plásticas não é suficiente para causar alterações significativas na microestrutura do material em apenas um ciclo. Porém, as pequenas

deformações plásticas cíclicas e irreversíveis geram dano acumulado, que eventualmente acarreta na falha por fadiga do material (Klesnil & Lukás, 1992).

Para materiais cristalinos, a deformação plástica que ocorre durante um carregamento cíclico está relacionada ao movimento de discordâncias sob a ação de tensões cisalhantes, que resultam no deslizamento relativo entre dois planos atômicos. O deslocamento dos planos é diretamente proporcional à tensão cisalhante aplicada e com o aumento do número de ciclos, os planos tendem a se separar gerando uma trinca no material. Conforme o número de ciclos cresce, a trinca se propaga podendo gerar uma falha repentina.

Em um material policristalino, onde os planos atômicos estão orientados de forma aleatória no grão, a deformação plástica se inicia nos planos alinhados com a direção da tensão de cisalhamento máxima. Portanto, o deslizamento dos planos ocorre em grãos específicos, enquanto as outras regiões do complexo cristalino se mantêm na zona de deformações elásticas. Neste caso, as deformações plásticas são de ordem muito pequena e representam maior dificuldade de detecção (Fadel, 2010).

O mecanismo de fadiga de um material pode ser dividido nas seguintes etapas consecutivas mostradas na Figura 2.1: nucleação de microtrincas, propagação/crescimento das trincas e ruptura final.

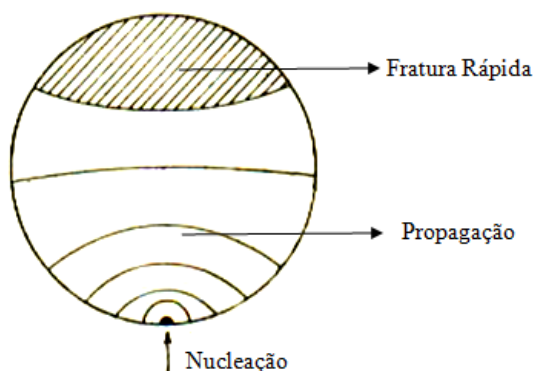


Figura 2.1. Etapas e aspectos macroscópicos da superfície em um processo de falha por fadiga.

A nucleação de microtrincas ocorre, em geral, na superfície do material e em regiões onde a tensão é máxima devido a concentradores de tensão, como entalhes e furos. Na superfície do material, os grãos se encontram menos sustentados mutuamente do que os grãos no interior do complexo cristalino, o que facilita a deformação plástica localizada e a iniciação da trinca (Duggan & Byrne, 1977). Em casos onde a nucleação inicia a partir de um ponto no interior do material, existe normalmente uma interface microestrutural frágil, como por exemplo, uma inclusão ou um vazio.

A etapa de nucleação envolve, respectivamente, a formação de bandas de deslizamento, a formação de micro extrusões e intrusões e o desenvolvimento da trinca nas intrusões. As bandas de deslizamento são conjuntos de planos cristalinos que sofrem deformação plástica e deslizam entre si,

dando origem às intrusões e extrusões na superfície do material conforme a densidade de planos vai aumentando. O processo de nucleação é mostrado na Figura 2.2.

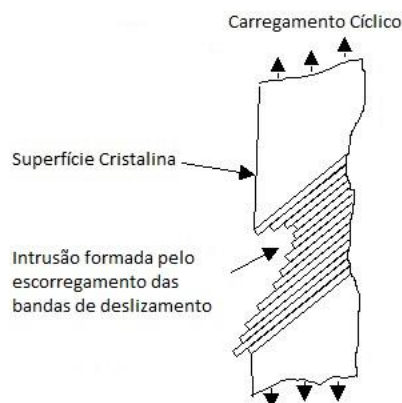


Figura 2.2. Processo de nucleação da trinca e formação de intrusão na superfície do material.

A etapa de crescimento e propagação das microtrincas é segmentada em dois estágios: a propagação estável e a propagação instável. Na propagação estável ou estágio I, as microtrincas se propagam ao longo dos planos persistentes de deslizamento, onde a tensão de cisalhamento é máxima. Geralmente, estes planos estão posicionados a 45° em relação à direção de aplicação da carga. Quando atingem certo comprimento, as trincas tendem a se propagar na direção normal à tensão de tração, deixando os planos persistentes de deslizamento, o que caracteriza a propagação estável ou estágio II. Neste estágio, normalmente, apenas uma trinca continua a crescer, enquanto as outras microtrincas cessam e permanecem no estágio I (Klesnil & Lukás, 1992).

O tamanho da trinca no estágio de propagação estável, até que ocorra a transição para o estágio de propagação instável, varia de acordo com o material e a amplitude de tensões. Em geral, quanto maior a amplitude da tensão cíclica, mais rapidamente ocorre a transição e menor é o comprimento das trincas no estágio I. A Figura 2.3 mostra de forma esquemática a propagação de uma fissura em dois estágios.

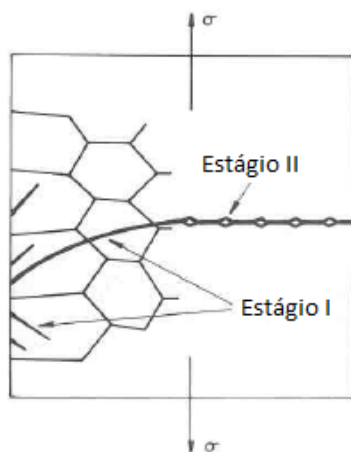


Figura 2.3. Processo de propagação da trinca em dois estágios (Klesnil e Lukás, 1992).

Segundo Garcia et al (2000), em um processo de fadiga, a trinca avança progressivamente a cada ciclo de tensão e são criadas marcas características na macroestrutura da superfície de fratura chamadas de marcas de praia ou “beach marks”, conforme apresentado na Figura 2.4.

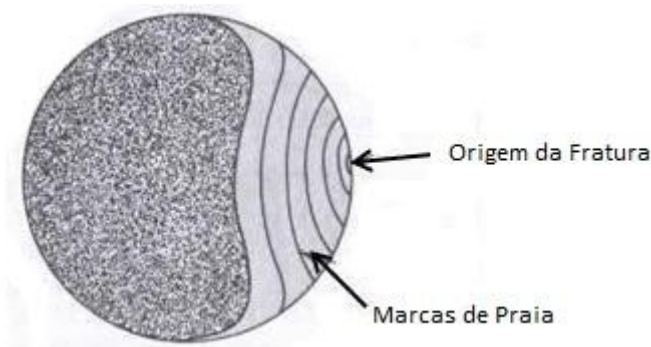


Figura 2.4. Fratura por fadiga com marcas de praia.

A última etapa do mecanismo de fratura por fadiga é a ruptura final ou falha catastrófica, que ocorre quando a seção transversal remanescente da peça, representada pela região hachurada na Figura 2.4, não suporta o carregamento aplicado e rompe de forma rápida e repentina. As características da ruptura variam de acordo com o material, e com a magnitude e tipo de tensão aplicadas.

2.1.2 Ciclos de Carregamento

A fadiga é um processo que só ocorre com a existência de variações temporais de tensões em um componente mecânico. E, portanto, se torna imprescindível a compreensão dos ciclos de carregamento que descrevem o comportamento da tensão aplicada ao longo do tempo.

De acordo com Branco et al, (1986), os ciclos de tensão podem ser classificados em dois grupos: os ciclos com amplitude de tensão constante (alternado, repetido e flutuante) e os ciclos com amplitude de tensão variável (aleatório ou irregular). As Figura 2.5 e Figura 2.6 exemplificam ciclos de carregamento com amplitude constante alternada e flutuante; e um ciclo de carregamento irregular, respectivamente.

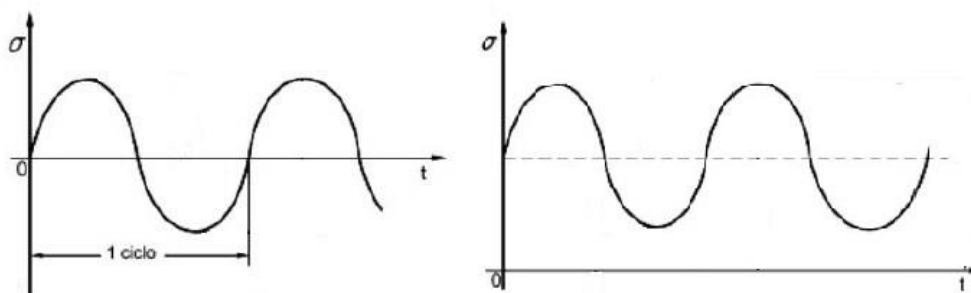


Figura 2.5. Amplitude de tensão constante alternada e flutuante (Branco et al, 1986 – adaptado).

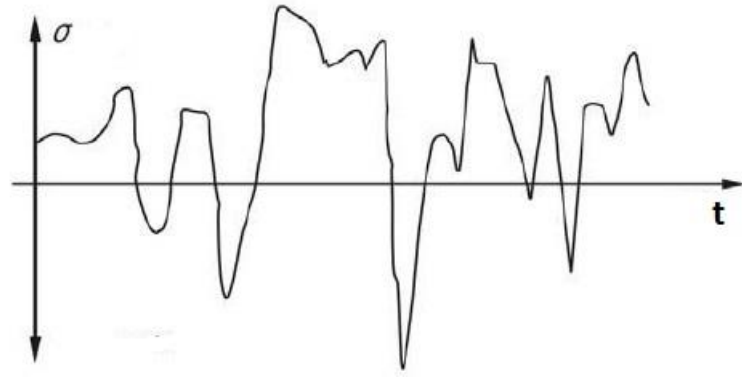


Figura 2.6. Ciclo de carregamento aleatório (Garcia *et al*, 2000 - adaptado).

Em algumas aplicações práticas, incluindo diversos ensaios de fadiga em materiais, os ciclos de carregamento com amplitude de tensão constante são bastante comuns.

Os principais parâmetros utilizados na descrição de tais ciclos de tensão de fadiga são: a amplitude de tensão ou tensão alternada σ_a , a tensão máxima σ_{max} , a tensão mínima σ_{min} , a tensão média σ_{med} e a faixa de tensão $\Delta\sigma$. Os parâmetros são mostrados na Figura 2.7.

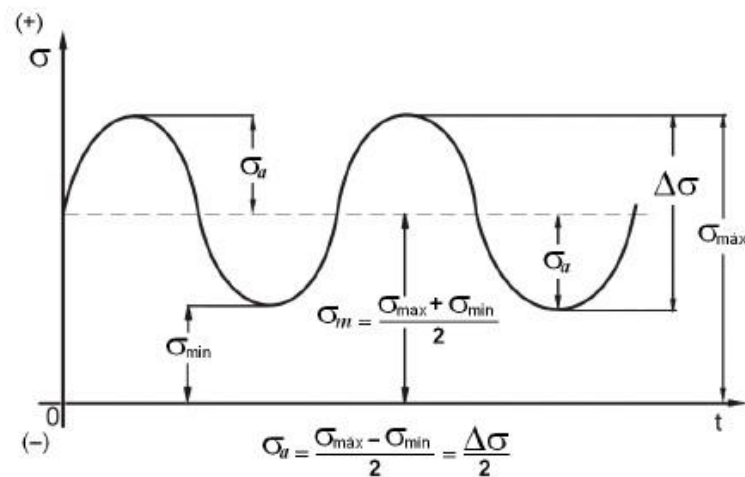


Figura 2.7. Parâmetros de um ciclo de carregamento com amplitude de tensão constante (Fadel, 2010).

A faixa de tensão $\Delta\sigma$ é dada pela diferença entre a tensão máxima σ_{max} e a tensão mínima σ_{min} ; a tensão média σ_{med} é obtida pela média aritmética das tensões máxima e mínima; e a amplitude de tensão σ_a é a metade de $\Delta\sigma$. Estas relações são descritas nas Eq. (1), (2) e (3).

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

Pode-se ainda definir uma razão de tensões R_t e uma razão de amplitudes A , dadas pelas Eq. (4) e (5), respectivamente. Estes parâmetros também são utilizados na caracterização do carregamento aplicado.

$$R_t = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_{med}} \quad (5)$$

Para carregamentos cíclicos com tensão média nula, pode-se definir o comportamento da tensão com a utilização de apenas um dos parâmetros, como σ_a ou σ_{med} . Nos casos em que a tensão média é não nula, deve-se utilizar dois parâmetros independentes. Além disso, em um carregamento alternado, a tensão média é nula e $R = -1$. Para carregamentos repetidos, a tensão mínima é igual a zero e R é nulo.

2.1.3 O Método S-N para Previsão de Vida à Fadiga

As equações ou leis que determinam o comportamento do material em um processo de fadiga são, em geral, obtidas através de ensaios experimentais. Corpos de prova são sujeitos a carregamentos cíclicos uniaxiais com amplitudes de tensão constantes até que a falha completa ocorra. Obtém-se então, a curva S-N ou curva de Wöhler, que relaciona o número de ciclos (N) com a amplitude de tensão aplicada (S), e representa uma forma prática e rápida de apresentação de resultados para ensaios de fadiga. A Figura 2.8 demonstra um exemplo de curva S-N.

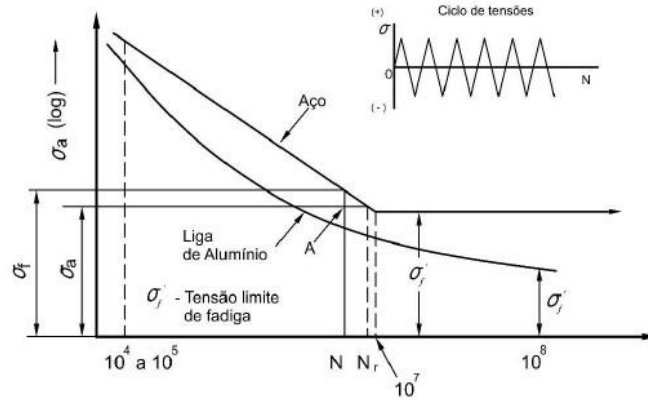


Figura 2.8. Curva S-N esquemática para um aço maciço e uma liga de alumínio (Branco, 1986).

Observa-se através do diagrama S-N, que o número de ciclos necessários para a falha do corpo de prova aumenta na medida em que os níveis de tensão aplicados diminuem. A partir de certo número de ciclos, a curva S-N se aproxima assintoticamente de um nível de tensão chamado de limite de resistência à fadiga. Para qualquer valor de tensão abaixo do limite de resistência, a vida do componente é considerada infinita.

Segundo Garcia et al (2000), o procedimento de ensaio se dá com a aplicação inicial de uma amplitude de tensão elevada, em geral, 2/3 do limite de resistência à tração do material ensaiado. O procedimento é repetido com amplitudes de tensão constantes gradativamente menores até que se atinja um nível de tensão onde o corpo de prova não rompa. O ensaio prossegue então com o aumento gradual da amplitude de tensão para a obtenção do valor mais próximo do limite de resistência à fadiga do material. Normalmente, para facilitar a visualização dos resultados, o número de ciclos é colocado em escala logarítmica.

É possível estabelecer uma correlação aproximada entre a amplitude de tensão $\sigma_a = S$ e a vida em fadiga $N_f = N$ do material. A curva S-N logarítmica pode ser linearizada a partir da Eq. (6).

$$S = \sigma_a = C + D \cdot \log(N_f) \quad (6)$$

onde os parâmetros C e D são constantes. A Equação (6) pode ser manipulada e reescrita na sua forma mais conhecida, a equação de Basquin, dada pela Eq. (7):

$$\sigma_a = \sigma_f (2N_f)^b \quad (7)$$

onde σ_f é o coeficiente de resistência à fadiga e b é o expoente de resistência à fadiga ou expoente de Basquin, ambos obtidos através de ensaios uniaxiais em corpos de prova não entalhados.

2.1.4 A Influência da Tensão Média na Resistência à Fadiga

A maioria dos resultados experimentais de resistência à fadiga encontrados na literatura corresponde a ensaios em condições de ciclo alternado com tensão média σ_{med} nula. Entretanto, situações em que $\sigma_{med} \neq 0$ são relativamente comuns e, para estes casos, as curvas S-N sofrem alterações significativas. Desta forma, a influência da tensão média no comportamento em fadiga de materiais é de grande importância.

Através do diagrama S-N mostrado na Figura 2.9, observa-se que à medida que a tensão média aumenta, ocorre uma diminuição tanto do limite de resistência à fadiga quanto na resistência à fadiga para vida infinita do material.

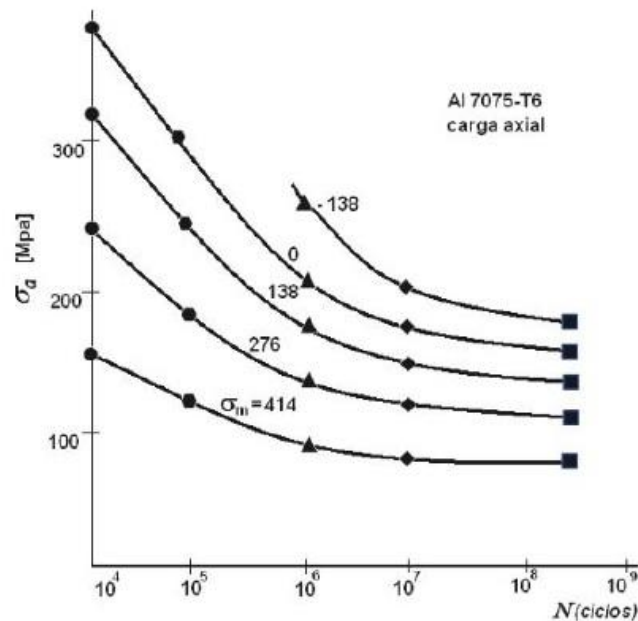


Figura 2.9. Diagrama S-N do alumínio 7075-T6 em diferentes faixas de tensão média (Dowling, 1999 - modificado).

Os efeitos da tensão média na vida em fadiga de um material podem ser visualizados também em diagramas de vida constante, como mostrado na Figura 2.10. Nestes diagramas, combinações de tensão média e amplitudes de tensão definem regiões seguras de operação de um componente em um número de ciclos de carregamento especificado. Para determinada vida em fadiga, a resistência à fadiga diminui na medida em que aumenta a tensão média do carregamento.

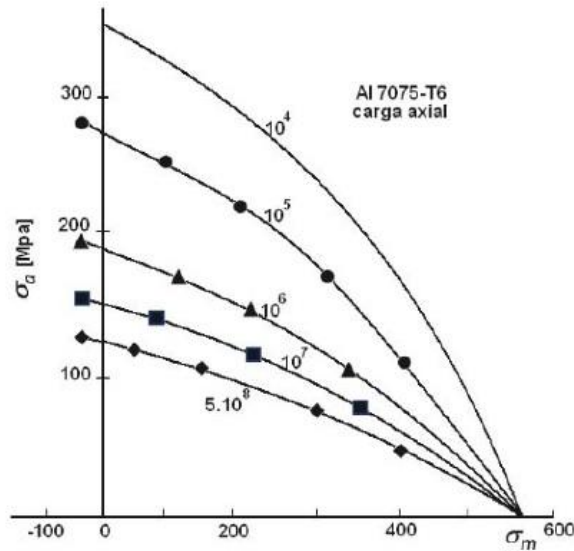


Figura 2.10. Diagrama de vida constante do alumínio 7075-T6 (Dowling, 1999 - modificado).

A influência da tensão média nas propriedades de fadiga do material vem sendo estudada desde o final do século XIX. Os primeiros estudos realizados sobre o tema foram iniciados por Gerber em 1874. A partir de então, surgiram diversas teorias buscando traduzir matematicamente os resultados experimentais de investigação dos efeitos deste parâmetro no comportamento de materiais em fadiga. Pode-se citar também os estudos realizados por Goodman em 1899, Soderberg em 1930, Morrow na década de 60 e Smith-Thomson-Watson também na década de 60. Tais relações são apresentadas nas Eq. de (8) a (14).

Relação de Gerber, mais utilizada para materiais dúcteis:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\sigma_u}\right)^2} \quad (8)$$

Relação de Goodman, mais utilizada para materiais frágeis:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\sigma_u}\right)} \quad (9)$$

Relação de Soderberg, para projetos mais conservadores:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\sigma_y}\right)} \quad (10)$$

Relação de Morrow, para aços dúcteis onde $\sigma_f' > \sigma_u$:

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\sigma_f'}\right)} \quad (11)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_{med}}{\tilde{\sigma}_{fB}}\right)} \quad (12)$$

Relação STW (Smith-Thomson-Watson), aplicável a todos os materiais, devido à ausência de variáveis relativas a propriedades materiais:

$$\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{max}\sigma_a} \quad (13)$$

$$\sigma_{ar} = \sigma_a \left(\frac{2}{1-R}\right)^2 \quad (14)$$

onde σ_{med} é a tensão normal média, σ_{ar} é o limite de fadiga para $\sigma_{med} = 0$ e σ_a é o limite de fadiga para $\sigma_{med} \neq 0$, σ_y é a tensão limite de escoamento do material, σ_u é o limite de resistência, σ_f' é o coeficiente de resistência à fadiga e $\tilde{\sigma}_{fB}$ é a tensão verdadeira de resistência à fadiga. A Figura 2.11 mostra de forma esquemática as curvas para cada um dos critérios apresentados.

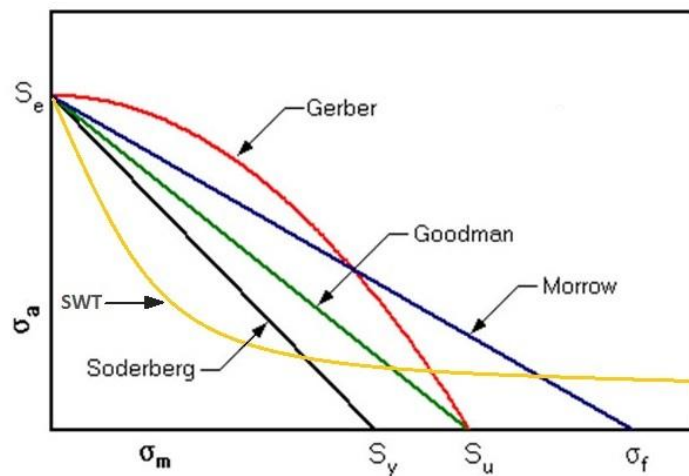


Figura 2.11. Diagrama esquemático mostrando as curvas para critério de fadiga apresentado.

Cada um destes critérios de fadiga apresenta um ajuste para determinada aplicação ou tipo de material. Por exemplo, para materiais dúcteis, os dados experimentais se aproximam da relação de Gerber; em materiais com baixa ductilidade, como aços de alta resistência, o critério de Goodman se aplica melhor. Pode-se observar no diagrama da Figura 2.11, que Soderberg é o critério mais conservador entre os ajustes lineares e Morrow é o menos conservador. Além disso, Smith-Watson-Topper (SWT) apresenta uma ótima aproximação para ligas de alumínio, de acordo com Bellorio (2009).

2.2 FADIGA EM CABOS CONDUTORES

O cabo condutor é considerado o elemento mais importante em uma linha de transmissão elétrica, realizando a função fundamental de transmitir energia. É importante observar, que o custo dos condutores, associado ao material e instalação, representa até 25% do investimento em linhas de transmissão (Henriques, 2006). Além disso, condutores aéreos estão sujeitos a uma gama de condições mecânicas e ambientais extremas, de modo que estes elementos necessitam de grande atenção no projeto de sistemas de transmissão.

Segundo CIGRE (2005), a fadiga resultante das vibrações induzidas pela ação dos ventos em condutores aéreos representa a maior causa de falhas mecânicas em linhas de transmissão. A associação entre o carregamento cíclico provocado pela oscilação do cabo tensionado sob ação do vento e o processo de *fretting* ao longo da vida do condutor, leva à iniciação e propagação de trincas, que posteriormente conduzem à falha do condutor.

Desta forma, um dos maiores desafios no projeto das linhas elétricas reside na previsão do comportamento vibratório do cabo, fator que influencia diretamente na vida em fadiga do elemento e limita alguns parâmetros de projeto, tais como a carga de tração e comprimento dos vãos entre as torres de transmissão (EPRI, 1979).

2.2.1 Excitação Eólica

A oscilação dos cabos condutores pode ser explicada pelo fenômeno das esteiras de vórtices de Von Kármán, que são padrões cíclicos de formação de vórtices causados pela separação instável do escoamento do fluido ao redor de corpos cilíndricos. Em geral, o fenômeno ocorre em regimes de escoamento laminar. A formação dos vórtices se dá em intervalos regulares que resultam em um movimento vertical alternado do cabo condutor. O fenômeno é mostrado na Figura 2.12.



Figura 2.12. Esquemático da oscilação do cabo sob ação do vento.

Os condutores estão sujeitos a três tipos de excitação eólica relacionadas a diferentes condições ambientais e efeitos sobre os cabos e outros elementos da linha de transmissão: a vibração eólica, a oscilação de sub-vão e o galope (*galloping*) (Henriques, 2006).

A vibração eólica é caracterizada por pequenas amplitudes de oscilação. Ocorre na presença de ventos de baixa ou moderada velocidade, de 0,8 até 8 m/s e são recorrentes em relevos planos ou levemente ondulados. Este tipo de excitação produz flexões alternadas com frequências que podem chegar a 150 Hz e não são facilmente detectáveis.

A oscilação de sub-vão ou oscilação induzida por esteira ocorre na presença de ventos laterais de velocidade moderada ou forte (4 a 18 m/s) quando existe a presença de condutores adjacentes. Ocorrem em baixa frequência (0,2 a 10 Hz) e atingem amplitudes de até 20 vezes o diâmetro do condutor.

O galope é causado por ventos fortes de 7 a 18 m/s, apresenta baixas frequências (0,1 a 3 Hz) e grandes amplitudes de oscilação que podem atingir até 300 vezes o diâmetro do condutor. O acúmulo assimétrico de gelo nos cabos é o principal fator na geração do galope de condutor. Este fenômeno, por apresentar grandes amplitudes de movimento, está relacionado com elevadas cargas dinâmicas. Os tipos de excitação eólica em condutores aéreos são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Tipos de excitação eólica em condutores aéreos (EPRI,1979).

Parâmetro	Tipo de Vibração		
	Eólica	Sub-vão	Galope
Tipo de condutor afetado	Todos	Linhas paralelas no plano horizontal	Todos
Tipo de vento	Permanente	Permanente	Permanente
Superfície do condutor	Sem cobertura ou com depósito simétrico de gelo	Limpa, seca	Com depósito assimétrico de gelo
Velocidade do vento [km/h]	3 a 23	15 a 60	23 a 60
Faixa de frequência [Hz]	3 a 150	0,08 a 3	0,15 a 10
Amplitude pico a pico [n° de diâmetros]	0,01 a 1	0,5 a 80	5 a 300

No Brasil, as vibrações de sub-vão e o galope de condutores são fenômenos pouco comuns devido ao regime de ventos e as condições climáticas do país. Entretanto, a vibração eólica é relativamente

comum, ocorrendo frequentemente em vãos de grandes dimensões, como em travessias de rios, segundo Fuchs *et al* (1992).

Um fator de grande influência no comportamento oscilatório de um cabo condutor é a tensão de esticamento EDS (*Every Day Stress*). Este parâmetro é definido como a tensão máxima a que um cabo condutor pode estar sujeito em uma determinada temperatura média anual sem que haja risco de danos devido às oscilações eólicas (CIGRE, 2005). É dado como uma porcentagem da carga de ruptura a tração (CRT) ou *ultimate tension stress* (UTS) do condutor.

A importância da EDS no projeto de cabos condutores se deve ao fato de que a tensão dinâmica relacionada ao processo de fadiga tende a aumentar com a tensão de esticamento. Isto ocorre, pois o auto-amortecimento do condutor é inversamente proporcional à EDS, de acordo com Rosa et al (1974), citado em Fadel (2010). Em outras palavras, um cabo com maior tensão de esticamento apresenta amplitudes de vibração mais elevadas. A Figura 2.13 apresenta a relação entre o fator de auto-amortecimento F e a tração de esticamento.

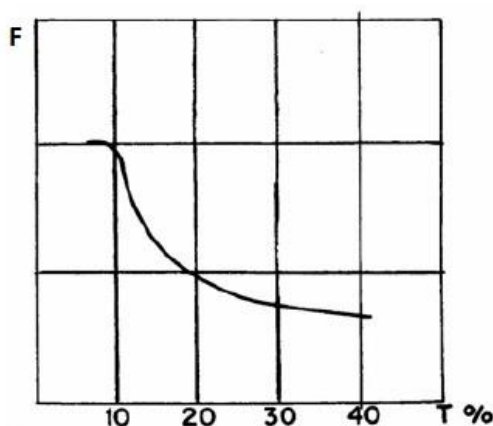


Figura 2.13. Variação do auto-amortecimento F com a tração de esticamento do condutor (Fuchs *et al*, 1992).

Por outro lado, no projeto de uma linha de transmissão, a altura do vão livre, que está também relacionada à tração de esticamento, deve garantir uma distância segura entre o cabo e o solo. Deste modo, a definição da EDS do condutor aéreo é uma questão fundamental para projetistas.

2.2.2 O Mecanismo de Falha por Fadiga em Cabos Condutores

Como mencionado anteriormente, a falha em cabos condutores resulta de uma combinação entre o processo de fadiga causado pelos esforços cíclicos de carregamento e o processo de abrasão ou *fretting* existente nas regiões de contato do condutor.

Os cabos condutores são formados por camadas de fios torcidos helicoidalmente em relação a um fio central e em sentidos opostos entre si. Esta configuração cria diversos pontos de contato favoráveis à ocorrência do *fretting*. A Figura 2.14 mostra o detalhe de um condutor CA e um esquema dos pontos de contato existentes em uma região de fixação.

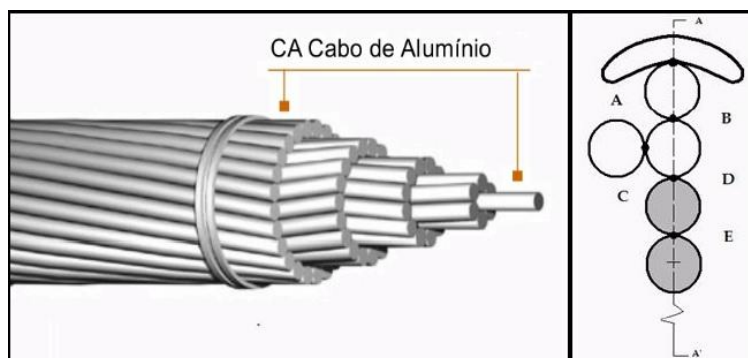


Figura 2.14. Conductor AAC em detalhe e regiões de contato.

O processo de falha do cabo se inicia nas zonas de contato, em pontos de fixação onde as forças de atrito, associadas ao movimento relativo entre os fios e ferragens de suspensão ou ancoragem geram marcas de abrasão no material que favorecem o surgimento de trincas superficiais. Após esta etapa de nucleação, as cargas cíclicas de tensão levam ao aumento da trinca e posteriormente à ruptura do cabo. A Figura 2.15 mostra em detalhe o dano por *fretting* em um cabo condutor.

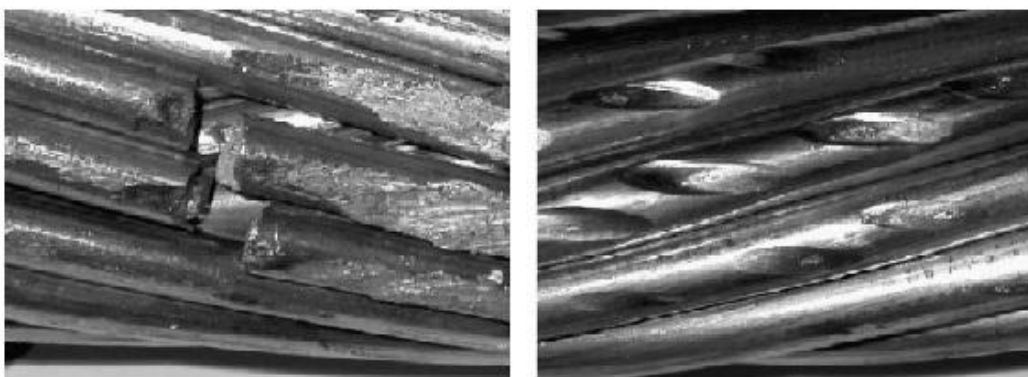


Figura 2.15. Ruptura de fios por fadiga e marcas elípticas de *fretting* (Bellorio, 2009).

A intensidade das cargas de contato envolvidas no *fretting* de condutores é relacionada com diversos fatores, como a carga de tração, a carga de aperto nos grampo, os materiais e a geometria dos elementos.

Ao compreender o mecanismo de falha, se torna possível o desenvolvimento de metodologias de previsão de vida e resistência à fadiga.

2.2.3 A Fórmula de Poffenberger-Swart

O cabo condutor é uma estrutura mecânica composta por um conjunto de fios enrolados helicoidalmente formando várias camadas que ao serem submetidos por alguma intensidade de vibração comportam-se com um movimento independente entre eles. Devido a essa complexa configuração de estrutura e do estado de tensões provocado pela flexão do cabo previamente tensionado, criou-se um modelo simplificado que foi desenvolvido por Poffenberger e Swart (P-S) em 1965.

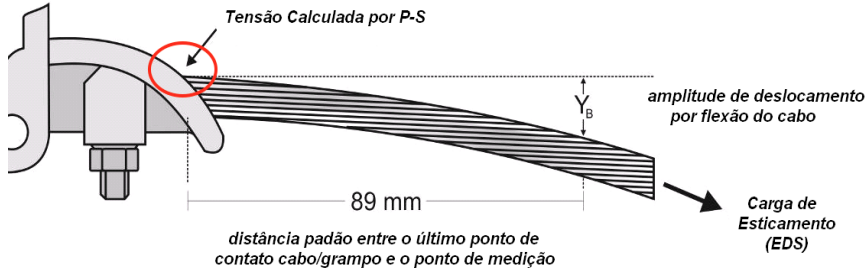


Figura 2.16. Localização da tensão calculada por P-S (Fadel, 2010).

Este modelo associa o condutor na zona de restrição a uma viga de Euler, como mostrado na Figura 2.16. O deslocamento vertical (medido pico a pico), de um ponto do cabo distante 89 mm do último ponto de contato (UPC) entre o cabo e o grampo de suspensão, produz uma tensão equivalente num fio da camada mais externa do cabo e na boca do grampo, cuja magnitude é dada pela Eq. (15):

$$\sigma_{P-S} = K \cdot Y_b \quad (15)$$

sendo σ_{P-S} a faixa de tensão dinâmica (zero a pico), Y_b a amplitude deslocamento pico a pico. O coeficiente K [N/mm³] de P-S é expresso pela Eq. (16):

$$K = \frac{E_a d_a p^2}{4(e^{-px} - 1 + px)} \quad (16)$$

onde E_a [Mpa] é o módulo de elasticidade (módulo de Young) da camada externa e d_a [mm] o diâmetro dos fios da camada externa do cabo (geralmente alumínio), x é a distância ao longo do cabo entre o último ponto de contato entre o cabo e o grampo de suspensão, e o ponto de medição, usualmente a 89 mm. Vale ressaltar que na fórmula original de P-S o quociente da constante K era dividido por 2 pois o Y_b era medido de zero a pico, mas como a medida usual no campo é de pico a pico a divisão passou a ser por 4. A rigidez p da montagem é expressa pela Eq. (17):

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI}} \quad (17)$$

onde T [N] é a carga de esticamento para a temperatura média durante a medição, EI [N.mm²] é a rigidez à flexão do cabo, cujo valor mínimo é dado pela Eq. (18):

$$EI_{min} = n_a E_a \frac{\pi d_a^4}{64} + n_s E_s \frac{\pi d_s^4}{64} \quad (18)$$

onde n_a , n_s , d_s e E_s são respectivamente, o número de fios da camada externa, número de fios do núcleo (geralmente o aço), diâmetro dos fios da camada interna e o módulo de elasticidade da camada interna.

Como o objetivo desse trabalho é também avaliar o parâmetro H/w nos condutores de alumínio, a Eq. (18) pode ser substituída pela Eq. (19), visto que, nesse caso, o cabo apenas possui fios de alumínio.

$$EI_{min} = n_{al} E_{al} \frac{\pi d_{al}^4}{64} \quad (19)$$

O uso da Equação (15) deve ser exercido com cuidado, pois segundo Azevedo (2009) ela não leva em consideração a variação da rigidez à flexão do cabo provocada pelas forças de interação entre os fios cujo valor se altera em razão da variação da carga de esticamento (nível de EDS), ou pelo comportamento dinâmico. Azevedo (2009) também ressaltou que para pequenos níveis de amplitude de vibração, deve-se esperar que os fios individuais do condutor não deslizem entre si e, portanto, o cabo tende a se comportar como uma barra rígida, respondendo a flexão com sua máxima rigidez. Por outro lado, à medida que a amplitude de vibração aumenta mais e mais fios passam a escorregar e a rigidez a flexão se aproxima de EI_{min} . Assim, conclui-se que a fórmula de P-S torna-se uma melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo.

A fórmula de P-S também desconsidera em sua formulação o fretting, que equivale ao desgaste por contato dos fios, que tem relação direta com o processo de falha dos condutores conforme Azevedo (2009). Deste modo, ensaios de fadiga de condutores em laboratório, utilizam a fórmula de P-S como referência para os níveis de tensão, ao passo que registram tais efeitos, implícitos na montagem, na vida experimental.

2.2.4 Metodologias de Estimativa de Vida em Fadiga em Cabos Condutores

Devido à complexidade do problema de fadiga em cabos condutores, não existe ainda um método analítico que tenha capacidade de modelar o fenômeno de forma satisfatória. Portanto, as metodologias de estimativa de vida em fadiga existentes se limitam a quantificar experimentalmente a intensidade de vibração e relacionar às amplitudes de tensão/deformação, ou medir diretamente os esforços dinâmicos através de *strain gages*.

2.2.4.1 Limite de Segurança EPRI (Doocy, 1979)

A metodologia do EPRI (*Electric Power Research Institute*), descrita no *Orange Book*, considera o limite de resistência à fadiga obtido experimentalmente como valor máximo admissível de amplitude de tensão, definição que garante uma vida útil extensa ao condutor. A partir dos valores de tensão máxima admissível obtidos, é possível calcular, através da fórmula de Poffenberger-Swart, amplitudes de vibração seguras para o cabo.

Para condutores ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*), a EPRI recomenda os limites de resistência descritos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Limites de resistência à fadiga segundo EPRI (1979).

Nº de camadas de fios de alumínio no cabo condutor	Limite de Resistência [MPa]
1	22,5
>1	8,5

2.2.4.2 Abordagem do IEEE: Máxima deformação em flexão (IEEE, 1966)

A metodologia desenvolvida pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) se baseia na máxima deformação admissível em flexão para que não ocorram danos por fadiga no cabo. Para um condutor ACSR, foi estipulada inicialmente uma deformação máxima admissível de 150 μ strain (*microstrains*) pico a pico.

Posteriormente, o critério se mostrou muito conservador (CIGRE, 2006) e foram sugeridos novos valores limite. Observa-se atualmente, a utilização de 150 até 300 μ strain entre as empresas do setor que adotam o critério da deformação máxima.

2.2.4.3 Metodologia CIGRÈ: Limite de Segurança

A CIGRE (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) propõe uma metodologia de avaliação da vida remanescente do condutor através da combinação de dois conjuntos de dados: o comportamento oscilatório do condutor medido em campo com a utilização de vibrógrafos instalados nas linhas de transmissão e as curvas S-N características geradas em ensaios de laboratório.

Com a utilização de um vibrógrafo instalado em campo, obtêm-se os níveis de amplitude de vibração pico a pico e respectivas frequências no UPC durante o período de alguns meses. Posteriormente, através da equação de Poffenberger-Swart, os valores são convertidos em tensões de flexão para cada bloco de carregamento registrado.

A regra de Miner é então aplicada para quantificar a fração de dano resultante de cada bloco de carregamento. É necessária, para o cálculo do dano acumulado, a obtenção experimental da curva S-N

do condutor, utilizada para definir o número de ciclos admissível para cada nível de tensão. O resultado é dado em termos da vida remanescente do condutor em anos.

A abordagem inicial proposta pela CIGRE prevê a adoção de uma curva padrão denominada Curva Limite de Segurança ou *CIGRE'S Safe Border Line* (CSBL) ao invés de uma curva S-N obtida experimentalmente para cada caso. A CSBL é uma compilação de diversos ensaios de fadiga realizados em diferentes laboratórios e foi concebida para fornecer uma estimativa conservadora da vida útil de cabos condutores. A Figura 2.17 mostra a CSBL em comparação com outras curvas S-N.

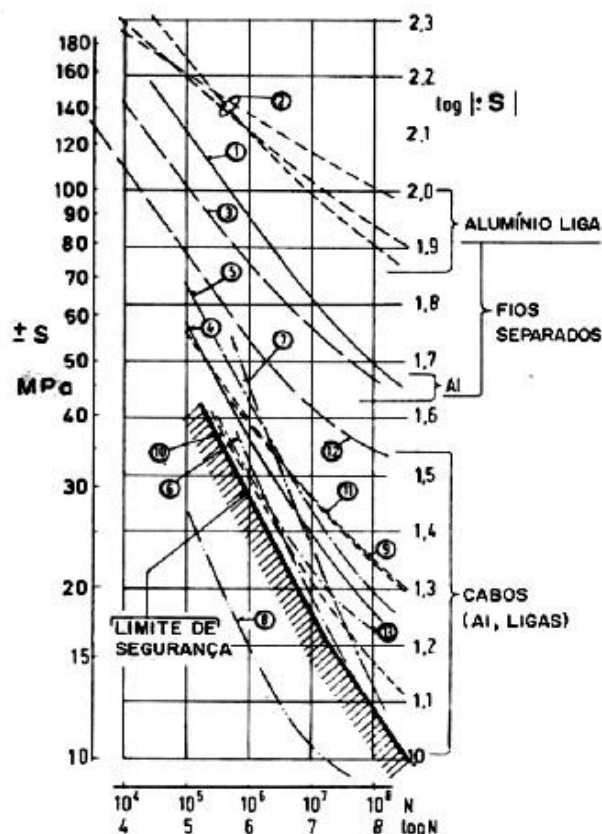


Figura 2.17. Curva Safety Border Line em comparação com algumas curvas S-N experimentais (CIGRE, 2003).

A Equação (20) descreve a CSBL, onde σ_a é a amplitude de tensão, N é a vida em ciclos e A e B são constantes realtivas ao material do condutor.

$$\sigma_a = A \cdot N^B \quad (20)$$

A Tabela 2.3 apresenta os valores das constantes da curva limite de segurança para diferentes condições.

Tabela 2.3. Constantes da Curva Limite de Segurança (CIGRE, 2006).

Nº de camadas de fios de alumínio no cabo condutor	Número de Ciclos			
	N<2.10 ⁷		N>2.10 ⁷	
	A	B	A	B
1	730	-0,2	430	-0,17
>1	450	-0,2	263	-0,17

2.2.5 O Parâmetro H/w

A definição das tensões de tração de condutores aéreos em estágio de projeto é de grande importância por diversos fatores. Em condições climáticas severas, a tensão atuante sobre o cabo não deve exceder os limites máximos pré-definidos. Por outro lado, a altura do vão livre deve se manter dentro de determinada faixa de segurança, inclusive em altas temperaturas e em cabos sujeitos à dilatação térmica. Além disso, um terceiro fator é a ocorrência de vibrações eólicas nocivas, cujas amplitudes estão intimamente relacionadas à tensão de tração.

O conceito de EDS (*Every Day Stress*), publicado em Zetterholm (1960), tem sido utilizado a mais de 40 anos para o projeto de linhas de transmissão. O parâmetro EDS é dado como uma porcentagem da carga de ruptura UTS (*Ultimate Tensile Strength*) do condutor e define a carga de tração ao qual este poderá ser submetido na temperatura predominante durante o ano. Entretanto, novas pesquisas acerca do tema nas últimas décadas têm demonstrado que os valores recomendados para a EDS não são totalmente adequados e resultam em um grande número de falhas, cerca de 45% dos cabos com vida em serviço entre 10 e 20 anos sofreram falhas prematuras (CIGRE, 2005). Esta inadequação da metodologia está associada a alguns fatores físicos não observados por este parâmetro.

Um dos problemas da metodologia EDS reside no fato de que os estudos da CIGRE foram realizados quando a maioria das linhas de transmissão pelo mundo ainda utilizava cabos do tipo CAA, com configurações bem diferentes de alguns tipos amplamente difundidos hoje, como os condutores CAL. Além disso, a energia de vibração induzida pelo vento é influenciada diretamente pelo diâmetro do cabo, parâmetro ignorado pelo critério EDS.

Para direcionar projetos de linhas de transmissão de maneira mais adequada, introduz-se então, o parâmetro H/w , onde H é a carga de tração horizontal na temperatura média do mês mais frio do ano e w é o peso por unidade de comprimento do condutor. Este critério se apresenta como uma alternativa mais abrangente em relação às características do cabo, levando em conta de forma direta ou implícita: o diâmetro; a massa; a rigidez; e o fator de auto-amortecimento, parâmetro relacionado ao esticamento do condutor.

Outro fator importante, não contabilizado pelo EDS, é a influência da turbulência nas amplitudes de vibração eólica. Existe hoje o conhecimento de que a turbulência está associada à cobertura da superfície e não ao relevo, como é descrito na metodologia EDS. Basicamente, a concentração de objetos de pequeno e médio porte no solo, como árvores e prédios, tende a gerar turbulência no escoamento do vento, enquanto terrenos com superfícies menos rugosas, como planícies com

vegetação rasteira e mar aberto, induzem escoamentos laminares, sujeitos a menores intensidades de turbulência (CIGRE, 2005). Regimes de vento com escoamento predominantemente laminar geram vórtices que oscilam de forma mais regular, e, portanto, causam oscilações mais acentuadas no condutor. A

Tabela 2.4 mostra valores de intensidade de turbulência para diferentes tipos de terreno e ventos fortes acima de 10 m/s.

Tabela 2.4. Intensidade de turbulência eólica para diferentes tipos de terreno (CIGRE, 2005).

Terreno	Intensidade de Turbulência
Mar aberto, grandes regiões planas.	0,11
Áreas rurais, áreas abertas com poucos obstáculos baixos.	0,18
Zonas construídas com baixa densidade, pequenas árvores, casas baixas.	0,25
Zonas construídas com alta densidade, grandes centros urbanos com prédios altos, regiões com árvores altas.	0,35

O parâmetro H/w é definido levando em conta a categoria de terreno em que se enquadra a linha de transmissão, como mostrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Limites do parâmetro H/w para cada categoria de terreno (CIGRE, 2005, adaptado).

Categoria do Terreno	Características do Terreno	H/w
A	Aberto, plano, sem árvores, sem obstruções, com cobertura de neve, próximo a grandes lagos, rios ou mares, desertos planos.	1000
B	Aberto, plano, sem árvores, sem obstruções, sem neve, como em áreas rurais sem obstruções.	1125
C	Aberto, plano, sem ondulações, poucos obstáculos, vegetação rasteira, fazendas com poucas árvores, sebes e outras barreiras, prados e tundra.	1225
D	Área construída, com algumas árvores e prédios, por exemplo, subúrbios residenciais, pequenas cidades, bosques, campos com pequenos arbustos, árvores e sebes.	1425

Para terrenos do tipo A, com maior tendência à geração de ventos em regime laminar, observa-se um H/w mais conservativo, pois a carga de tração horizontal no condutor deve ser menor, de modo a garantir uma capacidade de auto-amortecimento superior. Pode-se observar também, que terrenos com características da categoria D apresentam intensidades de turbulência superiores, o que resulta em

menores intensidades de vibração e, portanto, cargas de tração horizontal maiores podem ser aplicadas às linhas, resultando em valores superiores de H/w .

Ficam assim evidentes as razões primárias para a utilização do parâmetro H/w em oposição à EDS. O critério abrange aspectos quantitativos de auto-amortecimento do condutor e leva em consideração a turbulência relacionada a características do terreno, fatores não contabilizados pela metodologia EDS. Além de outras características importantes para o projeto seguro de linhas de transmissão.

Adicionalmente, o conceito H/w se apresenta como um parâmetro confiável para a comparação do risco de falhas por fadiga entre diferentes condutores sem amortecimento. De acordo com Claren (1978), diferentes tipos de condutor (CA, CAA, CAL, CALA) apresentarão os mesmos valores para resistência à fadiga e vida em fadiga quando sujeitos ao mesmo H/w . Isto se deve ao fato de que uma razão constante de 3:1 é assumida entre os módulos de elasticidade e massa específica do aço e do alumínio e o parâmetro H/w pode ser definido como uma constante vezes a tensão do alumínio S_{al} . Desenvolvendo a Eq. (21), obtém-se a Eq. (22), onde observa-se a relação descrita entre S_{al} e H/w .

$$\frac{H}{w} = \frac{A_{al}S_{al} + A_sS_s}{g(A_{al}\rho_{al} + A_s\rho_s)} \quad (21)$$

$$S_{al} = k \frac{H}{w} \quad (22)$$

onde A_{al} é a área da seção transversal da parcela de alumínio no condutor, A_s é a área da seção transversal de aço, S_s é a tensão do aço, ρ_{al} e ρ_s são respectivamente a massa específica do alumínio e do aço e g é a aceleração gravitacional. Sendo $S_s = 3S_{al}$ e $\rho_s = 3\rho_{al}$, fica evidente que o parâmetro independe do conteúdo de aço no condutor. Efetivamente, dado um conjunto de condições externas, o mesmo valor de H/w pode ser utilizado de forma segura para diferentes cabos.

Entretanto, segundo Barrett & Motils (2001), o parâmetro H/w apresenta uma falha relevante em relação à esta proposta de manter uma tensão constante do alumínio para diferentes condutores. A consideração inicial de que os módulos de elasticidade e as massas específicas são proporcionais com uma razão de 3:1 ignora efeitos da temperatura e deformações permanentes nos materiais do condutor.

A diferença de coeficientes de dilatação térmica implica que os materiais se comportam de forma bastante diferente em determinadas faixas de temperatura. Por exemplo, na temperatura média do mês mais frio do ano (-5°C no caso analisado), a tensão do aço é 2,83 vezes a do alumínio, valor que se aproxima da razão 3:1 e permite uma utilização segura do parâmetro H/w . No entanto, à temperatura ambiente, a tensão do aço chega a 4,7 vezes a tensão do alumínio. À medida que a temperatura

decrece, o alumínio contrai até duas vezes mais rápido que o aço e as tensões variam proporcionalmente (Barret & Motils, 2001).

Em síntese, de acordo com Barret & Motils (2001), o parâmetro H/w será adequado apenas em determinadas temperaturas. Quanto mais elevadas forem as tensões no alumínio, menores devem ser as temperaturas de operação para que o H/w possa ser aplicado devidamente. A Figura 2.18 apresenta um gráfico com a variação do parâmetro em função do tipo de condutor e temperatura.

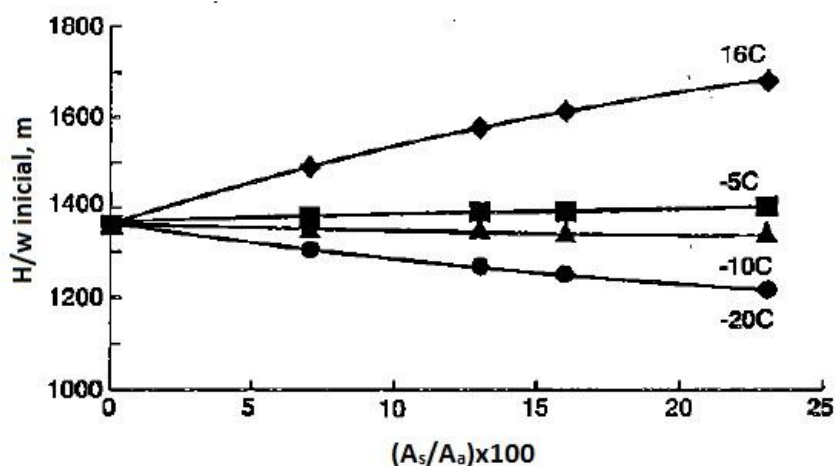


Figura 2.18. H/w em função da área transversal relativa do condutor para diferentes valores de temperatura (Barret & Motils, 2001).

Apesar das restrições, o parâmetro H/w ainda se apresenta como um critério de projeto mais razoável e abrangente entre as alternativas disponíveis. E, portanto, este estudo será focado na análise do H/w e nos seus efeitos sobre a vida em fadiga de condutores aéreos.

2.3 EXTENSOMETRIA

Extensômetros elétricos são dispositivos que medem deformação de corpos sólidos. Seu princípio de funcionamento está relacionado ao fato de que a resistência elétrica do dispositivo se altera com a deformação do circuito elétrico.

Extensômetros apresentam uma ampla gama de aplicações. Além disso, são dispositivos com relativa precisão, facilidade de utilização e a capacidade de monitorar as deformações até em ensaios destrutivos. Outras características dos extensômetros podem ser enumeradas abaixo:

- Extremamente leves e pequenos;
- Excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- Utilização possível para uma ampla faixa de temperatura;

- Aplicações submersas em água ou em gás corrosivo desde que utilizado tratamento apropriado;
- Medição em locais remotos.

Na Figura 2.19, pode-se observar os vários componentes de um extensômetro de resistência elétrica (ERE).

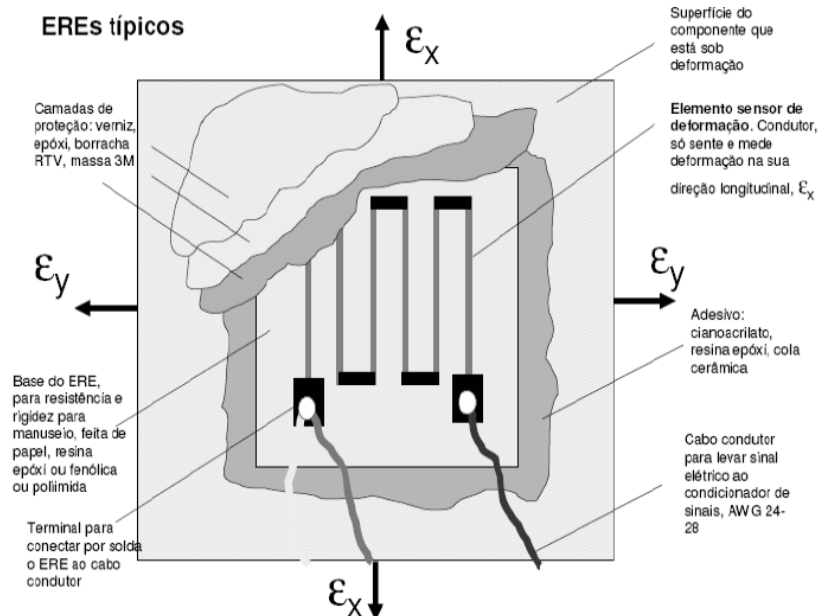


Figura 2.19. Extensômetro de Resistência elétrica (Doca, 2006).

2.3.1 Princípio de Funcionamento dos Extensômetros

O funcionamento dos extensômetros é baseado no fato de que materiais metálicos variam sua resistência elétrica ao sofrerem uma deformação.

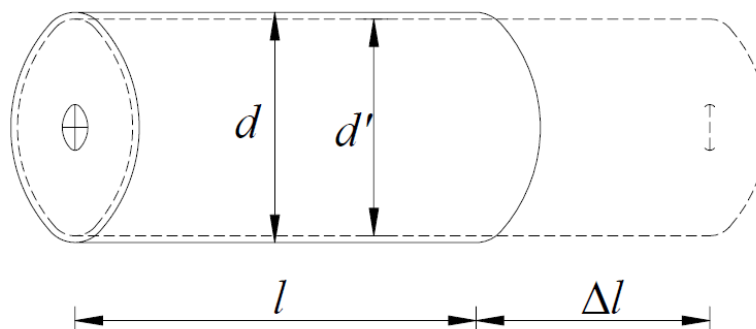


Figura 2.20. Deformação de um fio com carga de tração (Andolfato, 2004).

A Figura 2.20 representa um fio metálico com resistência R , como os condutores utilizados em extensômetros, em que l é o comprimento inicial (antes da deformação). A linha pontilhada representa o fio metálico deformado com o comprimento $l + \Delta l$ e consequentemente resistência $R + \Delta R$. A resistência elétrica é dada pela Eq. (22).

$$R = \rho \frac{l}{A_t} \quad (23)$$

sendo A_t a área transversal do fio e ρ a resistividade do material do fio.

A variação da resistência é proporcional à deformação do fio ε , com uma constante de proporcionalidade K_s definida como um fator de sensibilidade do extensômetro (Kou G. F. Gauge Factor). Esse fator de sensibilidade é dado pela Eq. (23).

$$K_s = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \quad (24)$$

onde ΔR é a variação de resistência do fio em Ω (Ohms), e K_s o fator de sensibilidade do extensômetro.

O fator de sensibilidade do extensômetro é função do tipo de material do fio e pode ser expresso pela Equação (24):

$$K_s = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu) \quad (25)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson do material e $d\rho$ a variação da resistividade elétrica do fio.

Alguns fatores de sensibilidade do extensômetro podem ser observados na

Tabela 2.6.

Tabela 2.6. Fatores de Sensibilidade do extensômetro (Fadel, 2010).

Material	Composição	K	Aplicação
<i>Advance ou Constantan</i>	45% Ni 55% Cu	2,1	<i>Uso geral</i>
<i>Karma</i>	74% Ni 20% Cr 3% Al 3% Fe	2	<i>Melhor compensação de temperatura, resistência a fadiga e estabilidade.</i>
<i>Isoelastic</i>	55,5 Fe 36% Ni 8% Cr 0,5% Mo	3,6	<i>Uso geral. Mas sensível à temperatura.</i>
<i>Nichrome</i>	80% Ni 20% Cr	2,1	<i>Para trabalhos a altas temperaturas. Resistentes à oxidação.</i>

<i>Platina-Tungstênio</i>	92% Pt	4,0
	8% W	
<i>Armour D</i>	70% Fe	2,0
	20% Cr	
	10% Al	

2.3.2 Tipos de Extensômetros

A Figura 2.21 mostra os vários formatos de extensômetros que são utilizados para diversas aplicações.

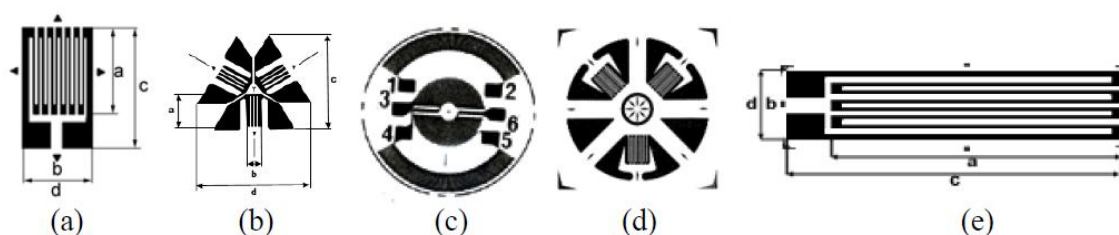


Figura 2.21. a) Unidirecional; b) Roseta Tripla 120 graus; c) Diafragma (pressão); d) Tensão Interna; e) Unidirecional Longo (concreto); (Doca, 2006).

2.3.3 Especificações Usuais dos Extensômetros

As características mais importantes dos extensômetros são especificadas por códigos para facilitar sua identificação. Cada fabricante possui uma classificação própria e através da Figura 2.22 e Figura 2.23 podemos ver os padrões de especificação dos extensômetros da *Kyowa* e *MicroMeasurements*, respectivamente:

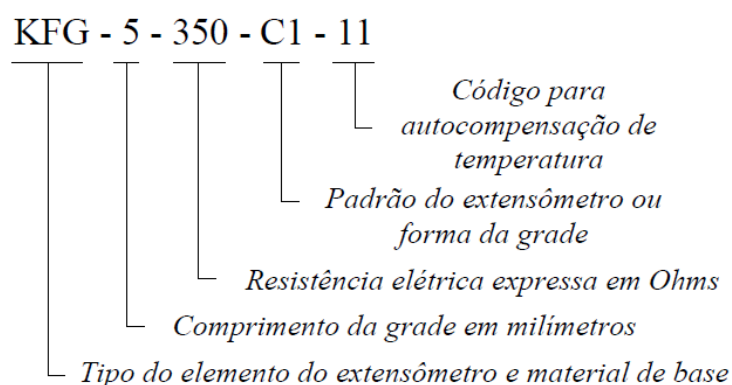


Figura 2.22. Extensômetros da *Kyowa* (Andolfato, 2004).

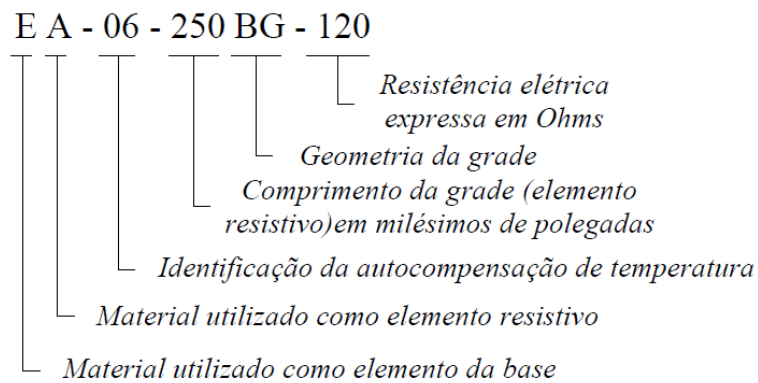


Figura 2.23. Extensômetros da MicroMeasurements (Andolfato, 2004).

2.3.4 Extensometria nos Cabos Condutores de Energia

A equação de Poffenberger-Swart (P-S) é extensivamente aplicada para a determinação da tensão nominal na zona de falha de cabos condutores e para a validação, determinação da abrangência e limitação da equação, utiliza-se a extensometria nos ensaios experimentais. Além disso, através da extensometria, pode-se verificar a qualidade dos dados obtidos para a construção das curvas S-N do condutor ensaiado.

Os extensômetros são instalados no último ponto de contato cabo/grampo (UPC), segundo o modelo descrito por P-S, como mostrado na Figura 2.24.

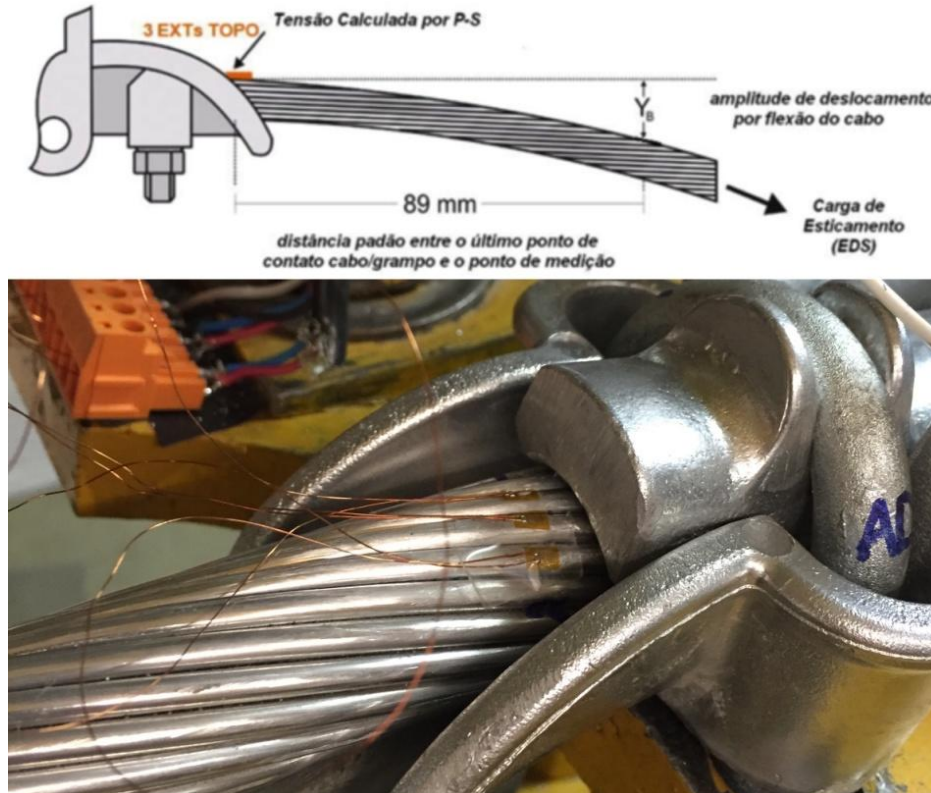


Figura 2.24. Esquema de posicionamento do extensômetro no ponto de máxima tensão.

2.3.5 Ponte de Wheatstone

A Ponte de Wheatstone é um circuito elétrico especial utilizado para medições de resistência elétrica com extrema precisão. O circuito pode ser utilizado para medições de qualquer grandeza física, contanto que exista o transdutor adequado. No caso de um extensômetro, a variação de resistência está associada à deformação do corpo de prova. O circuito básico de uma Ponte de Wheatstone está representado na Figura 2.25.

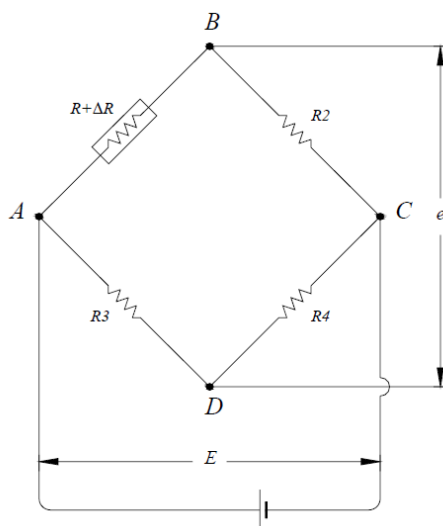


Figura 2.25. Representação da Ponte de Wheatstone (Andolfato, 2004).

O modelo de um quarto de ponte é utilizado quando se deseja medir deformações em um corpo de prova para dada direção como observado na Figura 2.26.

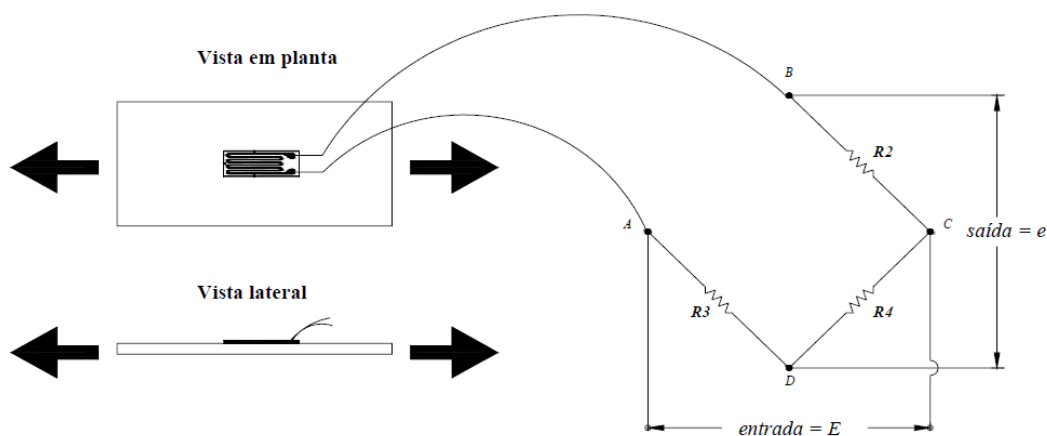


Figura 2.26. Medidas de deformações a 1/4 de ponte (Andolfato, 2004).

O circuito básico, representado na Figura 2.26, contém uma fonte de tensão (E), um galvanômetro (e), um resistor (R_2), dois potenciômetros (R_3 e R_4), e uma resistência desconhecida R (extensômetro).

Com o devido ajuste entre as resistências R_3 e R_4 , a Ponte de Wheatstone pode ser zerada ($e = 0$) de tal forma que não ocorrerá passagem de corrente através do galvanômetro. Nesta situação, os potenciais nos pontos B e D são iguais ($V_B = V_D$), ou seja, $e = 0$ volt. Assim, as diferenças de

potencial entre os terminais de R2 e R4 e de R e R3 serão iguais. Na Figura 2.27, pode-se observar as correntes elétricas que fluem no circuito.

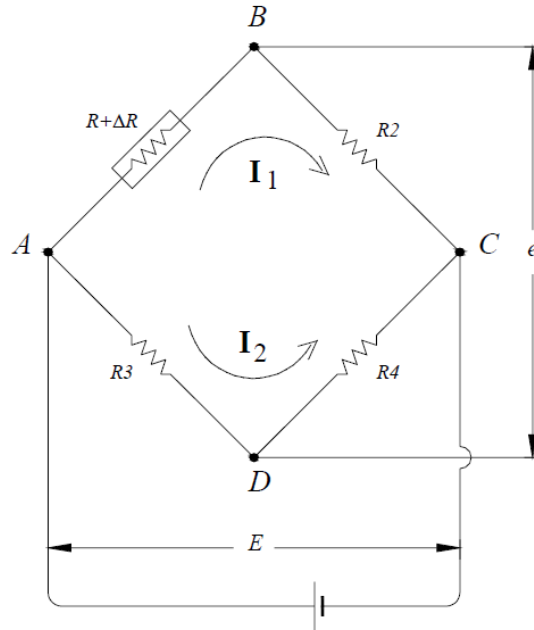


Figura 2.27. Correntes na Ponte de Wheatstone (Andolfato, 2004).

Sabe-se que a diferença de potencial entre R2 e R4 é igual, obtém-se então a Eq. (25):

$$I_1 R_2 = I_2 R_4 \quad (26)$$

Da mesma forma, R e R3 são iguais, como apresentado na Eq. (26):

$$I_1 R = I_2 R_3 \quad (27)$$

Dividindo-se a Equação (25) por (26), membro a membro, obtém-se a Eq. (27):

$$R = R_2 \left(\frac{R_3}{R_4} \right) \quad (28)$$

A Equação (27) permite calcular o valor de R para os valores conhecidos de R2, R3 e R4. Utilizando esta relação, pode-se quantificar a variação da resistência do extensômetro com a voltagem e entre os terminais B e D e em consequência a deformação do material pode ser medida.

Pode-se utilizar deste mesmo princípio desenvolvido acima para associações de extensômetros. Seguem na Figura 2.28 as três principais configurações da Ponte de Wheatstone (ponte completa, meia ponte, e um quarto de ponte).

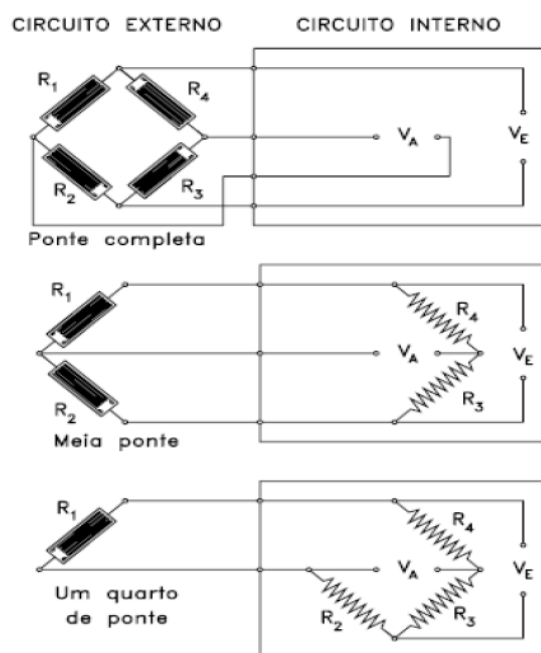


Figura 2.28. Tipos de associações de Extensômetros (Doca, 2006).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo dedica-se à descrição da bancada experimental do LabCabos/UnB, bem como a metodologia de ensaio aplicada para geração das curvas S-N, dos cabos CAL-900 e dos resultados de extensometria necessários para a validação da fórmula P-S. Serão realizados os ensaios para diferentes valores de H/w .

3.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Atualmente, o LabCabos/UnB conta com três bancadas de ensaio de cabos condutores (bancadas A, B e C), sendo que as bancadas A e B possuem a mesma configuração e a bancada C possui algumas modificações em relação às outras. A Figura 3.1 apresenta um diagrama esquemático das bancadas A e B. Conforme mostrado no esquema, o vão total é formado pela soma do vão ativo e do passivo, um comprimento máximo de 46,8 metros.

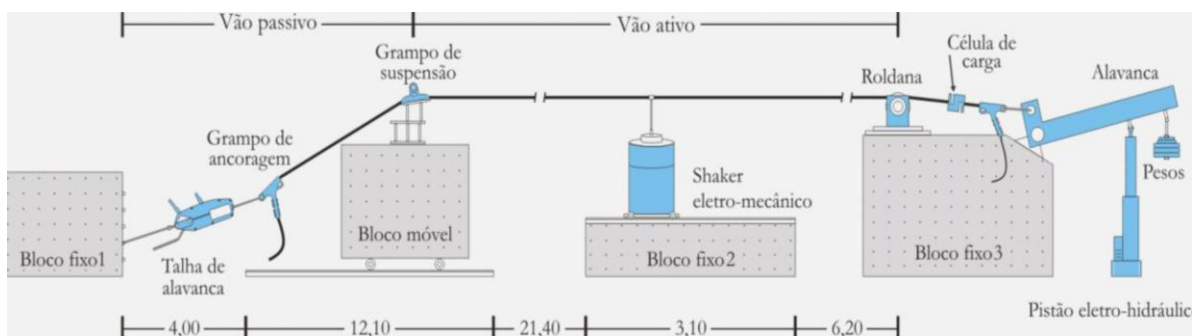


Figura 3.1. Configuração das bancadas de ensaio A e B (Fadel, 2010).

O tamanho do cabo a ser ensaiado é definido pelo vão ativo que se estende do centro do grampo de suspensão até o centro da roldana, podendo variar seu comprimento através do bloco móvel entre 41 e 31 metros. Inclusive, é no vão ativo que se encontram todos os dispositivos destinados ao controle do ensaio enquanto o vão passivo é utilizado apenas para a ancoragem do cabo.

Um bom ensaio em cabos condutores é feito sob controle rigoroso da temperatura. O LabCabos é bem equipado nesse quesito, visto que possui um sistema de climatização para distribuição de ar refrigerado de forma homogênea por toda a região das bancadas (Figura 3.2).



Figura 3.2. Pontos de distribuição de ar refrigerado no LabCabos.

3.1.1 Blocos Fixos e Móveis

Os blocos mostrados no diagrama esquemático da Figura 3.1 são de concreto armado maciço para garantir a rigidez da montagem. O bloco fixo 1 serve de base para prender o cabo em uma das extremidades. Sua ligação com o Tirfor (guincho manual de alavanca) permite a regulagem da carga de esticamento do condutor. A Figura 3.3 mostra o bloco fixo 1 e o Tirfor.



Figura 3.3. Bloco Fixo 1 da bancada A.

A principal função do bloco fixo 2 é sustentar o shaker (excitador eletrodinâmico). Além disso, o bloco 2 permite transladar o excitador na direção axial do cabo através dos trilhos, como visto na Figura 3.4. Essa mudança de posição do excitador é fundamental para melhorar a estabilidade do ensaio, pois pode-se definir a posição de nó ou anti-nó para uma dada frequência de vibração.



Figura 3.4. Bloco Fixo 2.

Na outra extremidade da bancada, encontra-se o bloco fixo 3, no qual são posicionadas a roldana e o apoio do braço de alavanca, como visto na Figura 3.5.



Figura 3.5. Bloco Fixo 3.

A variação do vão ativo é feita através da movimentação do bloco móvel sobre um par de trilhos de aço com perfil em I (construído sobre o piso do laboratório). Sua construção foi feita em cima de uma chapa (aço) espessa que possui dois eixos com rolamentos conforme mostrado na Figura 3.6. Além de variar a posição, este bloco serve de base para a mesa do grampo de suspensão. Esta mobilidade é exclusiva das bancadas A e B, a bancada C foi construída com um bloco fixo no lugar do móvel.

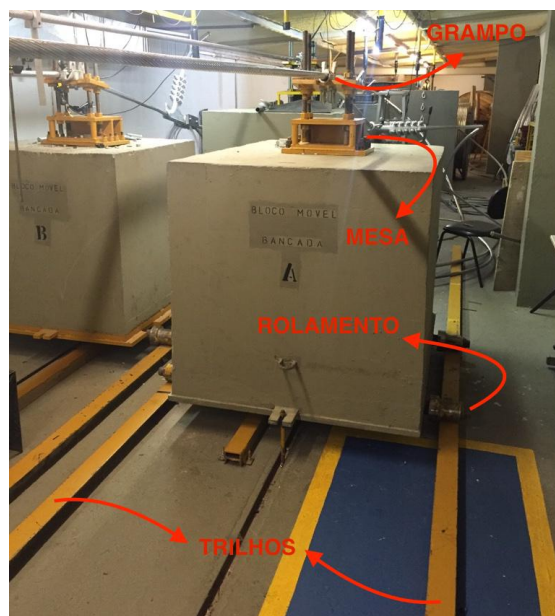


Figura 3.6. Bloco Móvel.

3.1.2 Mesa para Fixação do Grampo de Suspensão

O grampo de suspensão fica posicionado sobre um dispositivo metálico (mesa) fixado sobre o bloco móvel (Figura 3.7). A mesa foi feita com a possibilidade de simular uma angulação α de saída do condutor em regime de campo (geralmente 10° para grampos de suspensão).

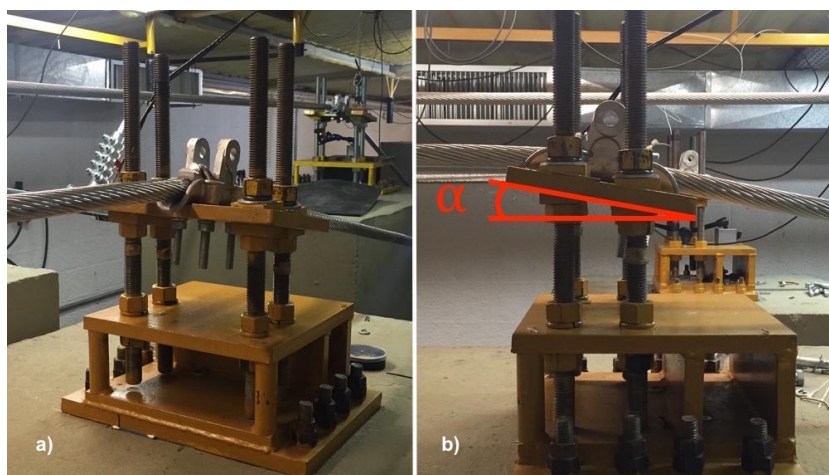


Figura 3.7. a) Mesa para Fixação do Grampo de Suspensão, b) Ângulo de mergulho.

A região de contato cabo/grampo é de grande relevância para o estudo de fadiga em cabos condutores, pois é o local de restrição do movimento, onde se desenvolvem as tensões devido a vibração do condutor, e consequentemente onde ocorrem as falhas. Vale ressaltar que a carga de aperto no grampo é de fundamental importância, pois uma carga de aperto muito elevada pode levar ao rompimento do grampo como abordado no trabalho de Fadel (2010).

3.1.3 Mecanismo de Vibração (Shaker)

O mecanismo responsável por simular a vibração induzida pelo escoamento do vento é o shaker ou excitador eletrodinâmico. Este equipamento permite o controle da excitação do sistema (frequência e amplitude) de maneira confiável, com a utilização de dois acelerômetros, um posicionado em cima da mesa do shaker e o outro localizado no ponto a 89 mm do UPC do grampo de suspensão (Figura 3.25). O dispositivo de vibração utilizado no LabCabos é do modelo Signal Force da fabricante Data Physics, conforme mostrado na Figura 3.8. A bancada A e B possuem um shaker enquanto a bancada C possui dois (o mesmo modelo para todas as bancadas).



Figura 3.8. Shaker utilizado no LabCabos.

3.1.4 Dispositivo de Tracionamento do Cabo e Roldana

O principal dispositivo responsável pela carga de esticamento é a alavanca, localizada na extremidade do bloco fixo 3. Este equipamento, mostrado na Figura 3.9, possui uma gaiola para adição de pesos e consequente aumento da tensão no condutor. O aumento da tensão no cabo começa com o Tirfor, sendo a alavanca utilizada no ajuste fino da carga.



Figura 3.9. Alavancas das três bancadas de ensaio.

Também conhecido como Tirfor, a talha de alavanca é responsável pelo ajuste da carga de tração no esticamento do condutor, sendo utilizada em conjunto com a alavanca no tracionamento do cabo. A Figura 3.3 mostra o Tirfor no laboratório de cabos junto ao bloco fixo 1.

A célula de carga ilustrada na Figura 3.17 faz a medição da carga de esticamento e fica localizada entre o grampo de ancoragem e a alavanca conforme o esquema da Figura 3.1. O valor da tração medida pela célula de carga é mostrado no visor digital (Figura 3.10) que se encontra ao lado do bloco fixo 3 da bancada B.



Figura 3.10. Visores das Células de Carga.

Localizada em cima do bloco fixo 3, a roldana serve para sustentar o cabo e permitir o movimento do mesmo na direção axial (Figura 3.11).



Figura 3.11. Roldana.

3.1.5 Dispositivo de Detecção de Quebra de Fios

O dispositivo de detecção de quebra de fios é formado por duas hastes de alumínio, uma abraçadeira específica para cada tipo de cabo e dois sensores de deslocamento a laser (Figura 3.12).

Com esse equipamento é possível detectar o número de ciclos em que ocorre a falha em um dos fios do condutor. Os sensores possuem faixa de medição entre 16 e 120 mm, uma resolução de 2 a 100 μm e são ligados a um aquisitor de dados que é descrito no tópico 3.1.6 (Figura 3.13).

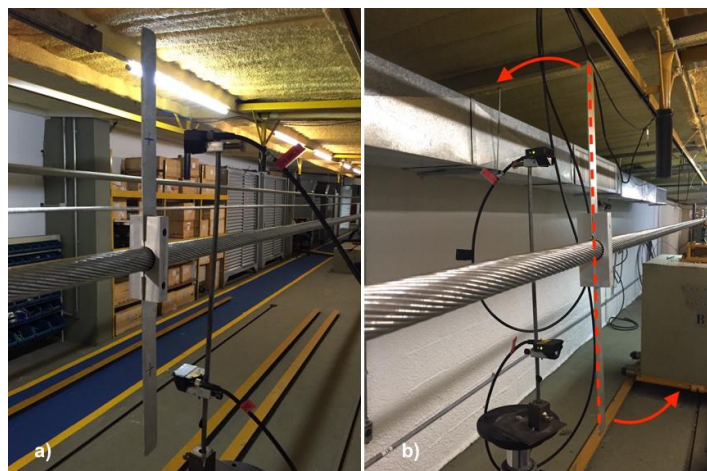


Figura 3.12. a) Dispositivo de detecção de quebras de fio, b) Simulação do movimento da régua.

O mecanismo detecta a rotação do condutor produzida pela ruptura dos fios que o compõem. Ao ser tracionado o cabo produz uma componente de força na direção longitudinal e outra na tangencial. Após a quebra de um fio a carga que antes era suportada pelo mesmo passa a ser distribuída nos fios restantes, resultando em uma rotação do condutor em relação a seu eixo longitudinal. Nesse momento, os sensores registram uma mudança de distancia entre os lasers e a haste de alumínio, indicando uma quebra.

Adicionalmente, como forma de verificação visual, é feita uma marca com um marcador permanente ao redor da superfície do condutor entre o grampo de suspensão e o acelerômetro. Desta forma, quando ocorre uma quebra no condutor, a linha sofre uma interrupção.

3.1.6 Sistema de Aquisição de Dados e Controle da Bancada

A bancada de ensaios do laboratório de cabos da UnB tem utilizado três aquisitores de dados ADS 2000 da empresa Lynx (Figura 3.13). Cada sistema possui pelo menos um módulo de aquisição, sendo que cada módulo é composto por 16 canais amplificadores de instrumentação. Segundo o fabricante, para aplicações que envolvem aquisição de dados de termometria, extensometria, tensões mecânicas e tensões elétricas, os condicionadores podem ser ajustados para entrada de strain gages (extensometria), termopares, transdutores de pontes, tensão, corrente e sensores platina (Pt100). Ajusta-se a configuração através de dip switcher (chave) ou pelo software AqDados.



Figura 3.13. a) Aquisitor da bancada A, b) Aquisitor da bancada B, c) Aquisitor da bancada C.

O software AqDados é um programa de aquisição de dados usado para coleta e armazenamento de sinais em arquivos de séries temporais. Através deste software, é possível amplificar o sinal de entrada em até 50 vezes. As principais características do software segundo a fabricante Lynx são:

- Aquisição de até 256 canais analógicos;
- Aquisição de até 64 canais de contagem de pulso;
- Aquisição de até 16 portas de entradas digitais com até 16 pontos em cada porta;
- Frequência de amostragem programável;
- Duração do ensaio programável;
- Tipos de ensaio: simples, múltiplo sequencial e múltiplo programado (horário inicial e intervalo entre pacotes programáveis).

O LabCabos possui uma sala exclusiva para controle das três bancadas de ensaio. O software responsável por controlar a vibração no cabo chama-se Shaker Control. Ele está configurado para manter as condições prescritas com referência ao ponto 89 mm. Através desse software, é possível aplicar no condutor ensaios senoidais, randômicos, blocos de carregamento senoidais, e também ensaios de choque. Para o contexto deste trabalho, foi necessário apenas conduzir o condutor a oscilações senoidais. Através do Shaker Control, deve-se interromper o ensaio nas seguintes situações:

- O ensaio atinja o número de ciclos previamente programado;
- Situações em que a amplitude de vibração atinja valores maiores que o programado;
- Se o dispositivo de detecção de quebras registrar três ou 10% de fios rompidos antes do término do número de ciclos (intervenção manual).

3.2 CORPOS DE PROVA

Uma descrição das características dos corpos de prova utilizados neste trabalho serão apresentados nos tópicos seguintes.

3.2.1 Cabo Condutor – CAL 900

O alumínio tem sido usado como material para cabos condutores de energia principalmente devido ao baixo custo em relação a outros metais condutores e às características elétricas e mecânicas do material. Desde o começo do século XX, foram utilizados de maneira intensiva os condutores elétricos com liga Al 1350, pois essa liga possui condutividade acima de 60% IACS (International Annealed Copper Standard). Porém, por apresentar resistência mecânica regular houve a necessidade de desenvolvimento de novas ligas com características mecânicas mais resistentes. Nesse contexto, foi desenvolvida a liga 6201 para condutores AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) ou CAL (Condutores de Alumínio Liga) e ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced).

A liga de alumínio com adição de magnésio e silício, possui por volta do dobro da resistência mecânica do alumínio (Al 1350 H-19) utilizado em cabos ACSR (Aluminum Conductors, Steel Reinforced). A liga 6201 pode, em determinadas circunstâncias, substituir a necessidade de condutores reforçados com alma de aço, o que significa redução nos custos das linhas de transmissão.

O presente trabalho destina-se à avaliação do parâmetro de projeto H/w em cabos de alumínio liga com designação CAL 900. A Figura 3.14 mostra a seção transversal do cabo CAL 900.

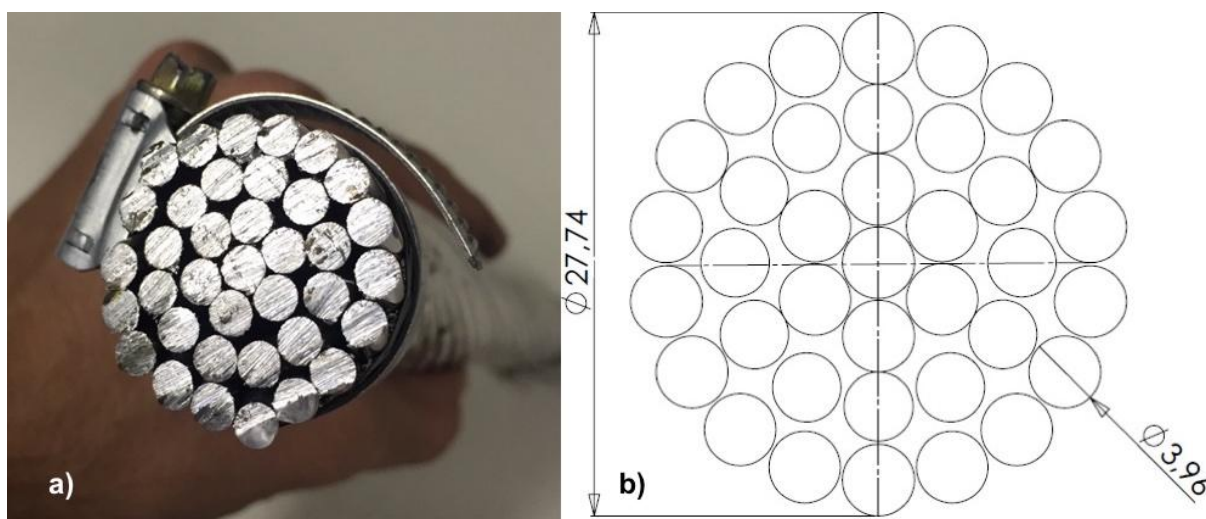


Figura 3.14. a) Foto da seção transversal do cabo CAL 900, b) Desenho esquemático da seção do condutor CAL 900.

A estrutura mecânica do cabo condutor CAL consiste em um encordado concêntrico de fios de liga 6201. Assim, o cabo possui várias camadas que se movem entre si quando submetidas a um movimento de vibração. Os esforços são distribuídos por todos os fios que compõem o cabo e cada fio se deforma como mostrado na Figura 3.15, ou seja, na direção em que foi enrolado.



Figura 3.15. Deformação Longitudinal do fio CAL 900.

Com o intuito de reduzir custos de projeto de linhas aéreas, são utilizados os condutores do tipo CAL. Segundo o catálogo da Nexans, a série CAL possui algumas vantagens listadas a seguir:

- Maior versatilidade para projeto;
- Boa resistência à corrosão;
- Alta relação ruptura/peso.

A Tabela 3.1 apresenta as propriedades básicas do alumínio liga para o CAL 900.

Tabela 3.1. Propriedades do CAL 900.

Bitola [kcmil]	Seção Transversa l [mm ²]	Número de Fios	Diâmetro [mm]	Diâmetro Nominal Condutor [mm]	Peso Nominal [kg/km]	Carga de Ruptura [kgf]
900	456.26	37	3,962	27,74	1251,9	13421

Os valores da Tabela 3.1 estão de acordo com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e também da ASTM (American Society for Testing and Materials).

3.2.2 Grampo de Suspensão

O grampo de suspensão utilizado para os ensaios dos condutores CAL 900 é uma peça de alumínio liga produzida pela Forjasul. Possui alta resistência mecânica, resistência a corrosão, não é magnética e possui elementos ferrosos zincados à quente conforme a NBR estipula. Esse grampo apresenta

ângulo de saída de no máximo 20° para evitar danos ao cabo e dimensões reduzidas para minimizar o momento de inércia. As especificações do modelo usado nos ensaios são mostradas na Tabela 3.2. A Figura 3.16 mostra o grampo, telha, parafusos, porcas e arruelas do grampo utilizado para o CAL 900.

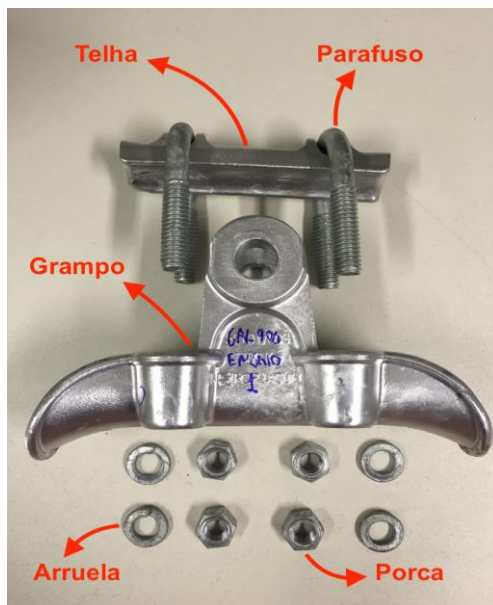


Figura 3.16. Vista explodida do Grampo de Suspensão Forjasul.

Tabela 3.2. Especificações do grampo de suspensão.

Grampo de Suspensão Forjasul					
Modelo	Diâmetro Máximo [mm]	Diâmetro Mínimo [mm]	Carga de Ruptura [kgf]	Torque Máximo [daNm]	Peso [kg]
55101/003	29	17	7000	60	1,28

3.2.3 Grampo de Ancoragem

O grampo de ancoragem é o dispositivo de fixação das extremidades do condutor. Na bancada de ensaios está ligado à célula de carga em uma das extremidades (Figura 3.17) e ao Tirfor (Figura 3.23) na outra. O modelo utilizado nos ensaios é fabricado pela Forjasul e é adequado para condutores de alumínio ou aço/alumínio. A peça é fabricada em liga de alumínio não magnética isenta de cobre e com elevada resistência mecânica. As especificações básicas da peça encontram-se na Tabela 3.3 e foram retiradas do catálogo do fabricante.



Figura 3.17. Grampo de Ancoragem.

Tabela 3.3. Especificações do grampo de ancoragem.

Grampo de Ancoragem Forjasul					
Modelo	Diâmetro Máximo [mm]	Diâmetro Mínimo [mm]	Carga de Ruptura [kgf]	Torque Máximo [daNm]	Peso [kg]
55121/003	31	23	13350	90	5,8

3.2.4 Extensômetros

No Laboratório de Cabos da Universidade de Brasília os extensômetros utilizados nos ensaios de fadiga em cabos são do tipo PA-03-120BA-350L, da empresa Excel Sensores. Estes extensômetros, de modelo unidirecional simples, são próprios para alumínio e possuem um fator de sensibilidade (gauges factor) de 2,13. A Figura 3.18 mostra a codificação do extensômetro da Excel.

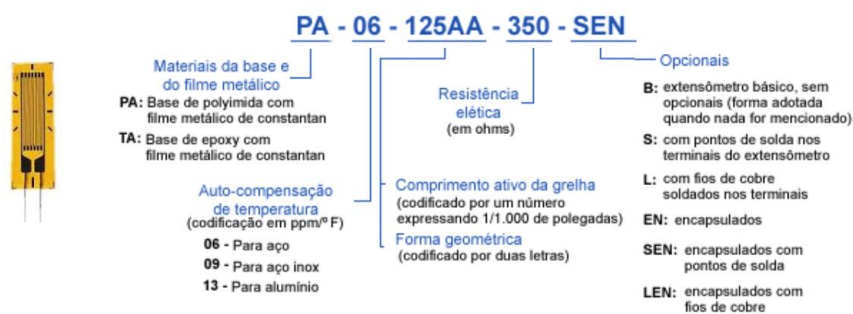


Figura 3.18. Codificação dos extensômetros da Excel Sensores.

3.3 METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DA CURVA S-N

O presente trabalho é focado na avaliação do parâmetro de projeto H/w aplicado ao condutor CAL 900. O levantamento de curvas S-N para diferentes valores de H/w é fundamental para a análise desse critério, bem como para o aperfeiçoamento deste parâmetro para projetos de linhas de transmissão e também para a comparação com o critério EDS.

Para garantir a confiabilidade do experimento deve-se tentar reproduzir as condições de operação em campo no laboratório da forma mais próxima possível.

3.3.1 Metodologia

A resistência em fadiga para corpos de prova sólidos, vista em detalhes no tópico 2.1.3, é obtida através de ensaios experimentais. De forma análoga, computa-se a degradação por fadiga do conjunto cabo/grampo de suspensão através das curvas S-N. Para garantir uma curva confiável, os testes de flexão cíclica devem assegurar amplitudes (Y_b) e cargas de esticamento fixas durante a vibração, pois assim, consequentemente, obtêm-se tensões nominais constantes.

Um rigoroso monitoramento das quebras dos fios de alumínio e o respectivo número de ciclos em que ocorrem é feito para levantar a curva S-N. A CIGRE recomenda que o ensaio seja interrompido com a ruptura de três fios de alumínio ou 10% do número total de fios do condutor ensaiado, sendo considerado o de maior valor. No caso do condutor CAL 900, o qual possui 37 fios de alumínio, adotou-se interromper o ensaio após a quarta quebra, definindo a partir daí o número de ciclos que é registrado na curva S-N, pois representa o inteiro mais próximo dos 10% recomendados pela CIGRE. Vale ressaltar que esse número de falhas está dentro da fronteira de segurança para a integridade física do cabo, não havendo o risco de uma falha total do condutor, e também dentro da tolerância da capacidade de transmissão de eletricidade.

Para definir os parâmetros que serão controlados no ensaio utilizaremos a equação de P-S e a Eq. (20) que é derivada da equação de Basquin abordada no tópico 2.1.3.

A Equação (28) fornece a relação entre a tensão e a vida em ciclos. Substituindo a equação de Poffenberger-Swart, no lado direito da Eq. (20) e isolando o número de ciclos obtém-se:

$$N = \left(\frac{E_{al} d_{al} T}{4 \left(e^{-\sqrt{\frac{T}{EI_{min}} x}} - 1 + \sqrt{\frac{T}{EI_{min}}} x \right) A(EI_{min})} Y_b \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (29)$$

onde EI_{min} a rigidez mínima do condutor é calculada através da Eq. (19).

Uma análise da Eq. (29) permite concluir que a vida estimada, segundo a equação de Poffenberger-Swart, será dependente dos seguintes fatores:

- Módulo de elasticidade do alumínio (E_{al});
- Diâmetro dos fios de alumínio (d_{al});
- Pré-tensão aplicada no condutor (T);
- Posição do sensor de medição de amplitude de flexão (x);
- Deslocamento Transversal (Y_b) medido pico a pico.

Dos fatores mencionados acima somente T , x e Y_b podem ser controlados no ensaio. Assim, com base na análise da Eq. (29), no trabalho de Fadel (2010) e de Henriques (2006), as seguintes condições foram consideradas para a realização dos ensaios:

- 1) *Torque das porcas do grampo de suspensão*: o grampo utilizado nos ensaios do cabo CAL 900 permite um torque máximo de 60 Nm (Tabela 3.2), mas segundo abordado por Fadel (2010), para evitar um amassamento excessivo e até a ruptura do grampo, utiliza-se a carga de aperto de 50 Nm.
- 2) *Ângulo de mergulho*: seguindo a recomendação de Henriques (2006), adotou-se um ângulo de mergulho de 10° por acreditar-se que seja a condição que menos afeta a fadiga.
- 3) *Carga de esticamento*: quanto maior for a EDS de uma linha de transmissão, menor será sua vida em fadiga, pois haverá um aumento na tensão média do condutor e consequentemente um aumento na tensão máxima. Assim, a variação da EDS para um mesmo tipo de cabo vai permitir analisar o impacto em cima da variação do H/w , visto que o peso linear (w) permanecerá constante. Para a realização dos ensaios do presente trabalho foram escolhidos valores de H/w que permitam a comparação com outros resultados de fadiga obtidos no LabCabos em diferentes condutores. Além disso, esses valores de H/w possibilitam que os ensaios sejam concluídos no período de execução desse trabalho. Pois, valores inferiores de H/w demandariam um longo tempo para finalização dos experimentos, o que prejudicaria o cronograma planejado.
- 4) *Amplitude de deslocamento*: está associada à tensão nominal que gera a falha no cabo. Para efeito de análise, as amplitudes de deslocamento escolhidas para os ensaios foram selecionadas de forma a gerar ensaios de duração viáveis, a um custo razoável e com valores de amplitude de deslocamento que geram a mesma tensão nominal para valores de EDS diferentes.

Para o levantamento da curva $S-N$ são necessários nove pontos, sendo que cada ponto representa um ensaio. São definidas três tensões nominais, previamente escolhidas, que serão convertidas para as respectivas amplitudes de deslocamento para cada H/w . Assim, serão realizados nove ensaios para

cada um dos H/w escolhidos, totalizando um total de 18 experimentos em cabos condutores CAL 900. A Tabela 3.4 apresenta os valores dos parâmetros de ensaio adotados para a geração das curvas $S-N$.

Tabela 3.4. Parâmetros adotados para os ensaios.

CAL 900								
H/w [m]	EDS [%]	K [Mpa/mm]	H [kgf]	Amplitude de Deslocamento (Yb) [mm]			Torque de Aperto [Nm]	Posicionamento do Sensor [mm]
				23,7 Mpa	28,22 Mpa	31,35 Mpa		
1820	17,00	33,30	2282	0,71	0,85	0,94	50	89
2144	20,00	34,83	2684	0,68	0,81	0,90	50	89

3.3.2 Procedimento Experimental

Para este trabalho serão analisados apenas condutores do tipo CAL 900, seguindo o procedimento laboratorial recomendado pela IEEE (1978), EPRI (1979) e CIGRE (1985). Vale ressaltar que os procedimentos seguintes podem ser aplicados para os outros modelos de cabos.

O processo de ensaio do corpo de prova foi desenvolvido no LabCabos e para facilitar o entendimento, o procedimento foi dividido em cinco passos: *Esticamento do Cabo*, *Instalação da Instrumentação*, *Armazenamento dos Dados*, *Retirada do Cabo* e *Coleta de Amostras*.

3.3.2.1 Esticamento do Cabo

1. Primeiramente, deve-se prender as polias nos suportes ao longo do vão da respectiva bancada que se pretende ensaiar (Figura 3.19).

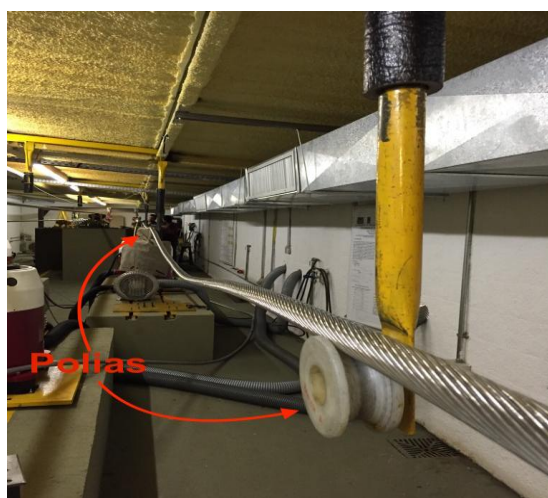


Figura 3.19. Posicionamento das polias.

2. Atrás do Bloco Fixo 1, ficam armazenadas as bobinas com os corpos de prova (Figura 3.20). Os cabos são puxados em direção ao bloco fixo 3 na outra extremidade da bancada, sempre passando o condutor pelas roldanas.



Figura 3.20. Bobina do cabo CAL-900.

É importante garantir que o cabo não irá arrastar em nenhuma outra superfície que não seja a polia. Assim, é recomendado que se utilize uma lona de borracha e um pano de couro conforme ilustrado na Figura 3.21.

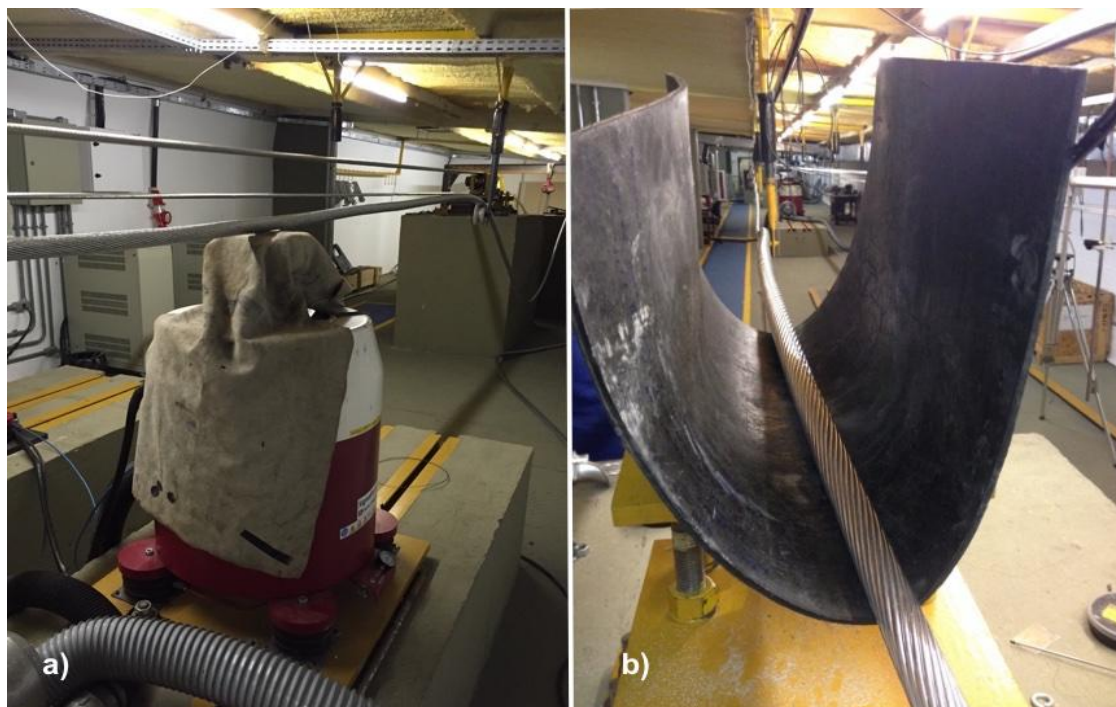


Figura 3.21. a) Pano de couro, b) Lona de borracha para proteção.

3. Posicionar o grampo de suspensão no bloco móvel sem apertar as porcas (Figura 3.22).



Figura 3.22. Grampo de suspensão posicionado sem as porcas.

4. Prender os dois grampos de ancoragem, respectivamente, com a célula de carga e com o Tirfor (Figura 3.23). Os parafusos devem ser apertados de forma gradual e cruzada para que não ocorra o empenamento dos componentes.

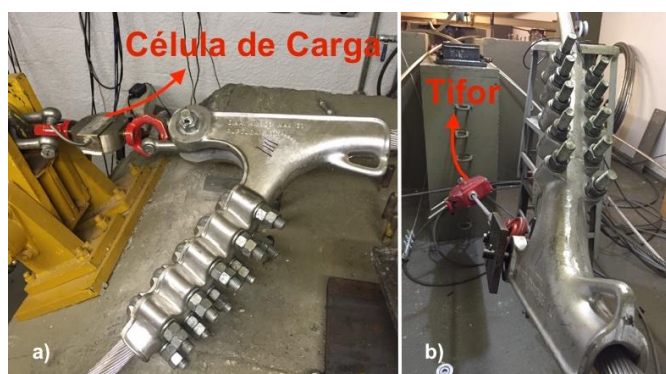


Figura 3.23. a) Célula de Carga, b) Tirfor conectado ao Grampo de Ancoragem.

5. Esticar o cabo usando a alavanca e o Tirfor. O processo inicia-se no Tirfor com uma pré-carga aplicada. Após o esticamento inicial do cabo, deve-se adicionar os pesos na alavanca para ajuste fino. Deve-se então puxar a corrente da talha para a que alavanca desça até que se atinja um valor de carga acima do desejado. A Figura 3.3 e a Figura 3.9 mostram o Tirfor e a alavanca, respectivamente.
6. Já com o cabo esticado, pode-se retirar as roldanas.
7. Esperar um período de cerca de 8 horas para acomodação do cabo por fluência.
8. Após o período de espera, retira-se o peso da alavanca até o visor apontar a carga desejada para o ensaio (Figura 3.9 e Figura 3.10).
9. Aperta-se o grampo de suspensão de forma gradual e cruzada e com a utilização de um torquímetro. É utilizada uma carga de aperto de 50 Nm (Fadel 2010).

3.3.2.2 Instalação da Instrumentação

1. Posicionar a braçadeira do acelerômetro em cima do dispositivo de alinhamento do *shaker* (mesa) conforme mostrado na Figura 3.24. Antes de apertar a braçadeira, deve-se passar a fita isolante no local em que a mesma será posicionada de modo a evitar o contato direto entre metais e o consequente desgaste. Após este procedimento, prende-se o acelerômetro.

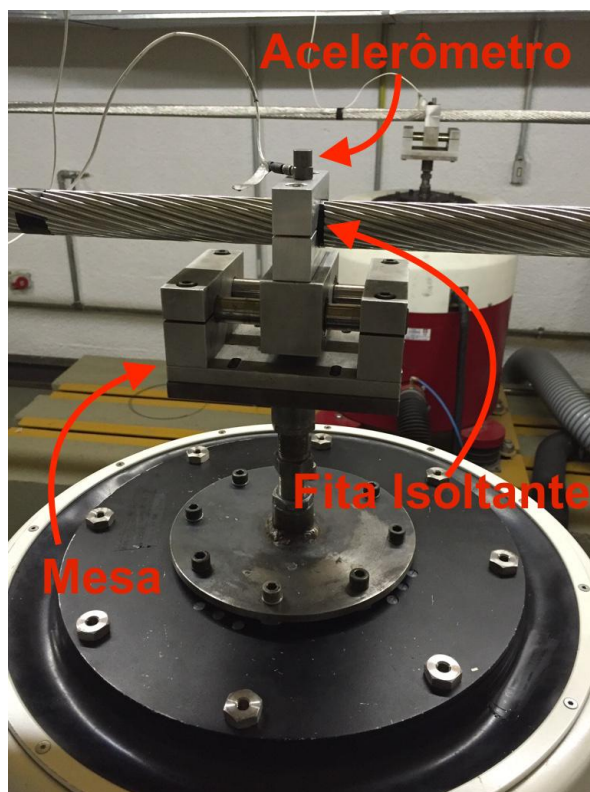


Figura 3.24. Mesa, acelerômetro e braçadeira.

2. De forma semelhante, deve-se posicionar a braçadeira do segundo acelerômetro a uma distância de 89 mm do UPC, lembrando-se de proteger o cabo com a fita isolante (Figura 3.25). Para definir a distância de 89 mm exata, utiliza-se um gabarito feito sob medida e com uma caneta marca-se o ponto no cabo. Após este procedimento, o acelerômetro é fixado.

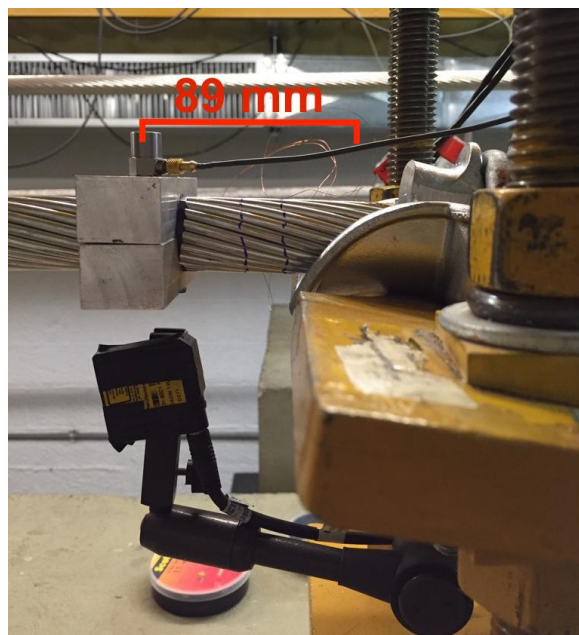


Figura 3.25. Posição do acelerômetro a 89 mm do UPC.

3. Cola-se três extensômetros no UPC segundo o passo a passo descrito no item 3.4.2. Vale ressaltar que este passo a passo é válido somente para os ensaios em que se deseja a medição de extensometria e caso não seja esta a intenção, deve-se pular para o próximo item.
4. Instalar o sensor de distância a *laser*, que será responsável por medir o deslocamento e consequentemente a contagem de ciclos do ensaio. O sensor deverá ser posicionado no ponto 89 mm e um pedaço de fita isolante deverá ser colado no ponto do foco do laser para facilitar a leitura (Figura 3.26).

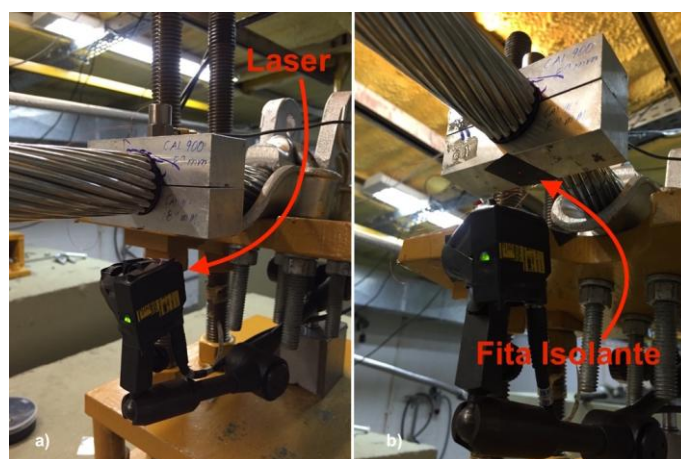


Figura 3.26. a) Sensor de distância, b) Fita isolante no ponto do foco.

Através dos *LEDs* (verde e vermelho) do sensor, recomenda-se procurar os pontos de maior e menor alcance e por fim posicioná-lo no ponto central.

5. A régua de detecção de quebras descrita no item 3.1.5 deverá ser posicionada no primeiro nó com referência no grampo de suspensão (Figura 3.27). Para identificar o local do nó, deve-se iniciar a vibração no cabo utilizando os parâmetros de ensaio e com uma caneta marcar o local onde será posicionada a régua. Novamente, deve-se colocar a fita isolante no local para proteção do cabo. Após a devida instalação da régua, deve-se se posicionar o par de *lasers* conforme a recomendação do item anterior.

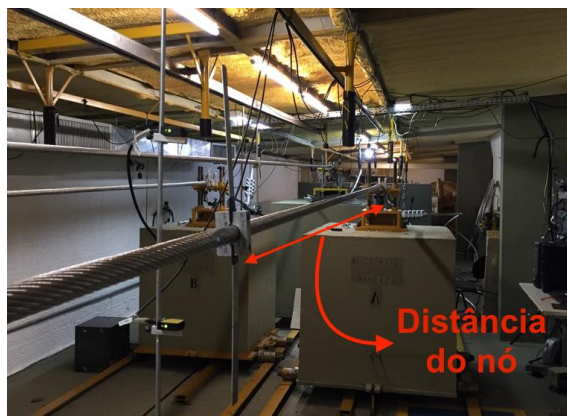


Figura 3.27. Posição da régua de detecção de quebras.

6. Liga-se o amplificador de acordo com as instruções que se encontram cima do mesmo (Figura 3.28).



Figura 3.28. Amplificador.

7. Após estas etapas do procedimento, resta apenas iniciar o ensaio. A configuração e controle de vibração são feitas através do software *Shaker Control*. Seu manuseio encontra-se no Anexo 1.

3.3.2.3 Armazenamento dos Dados

O armazenamento dos dados é realizado em tempo real e pode-se ser feito em cinco passos:

1. No respectivo computador (sala de controle) da bancada que está ensaiando, deve-se abrir o software *LTD*.
2. Clicar no ícone *Arquivos* e selecionar *Estatística*.
3. Abrir o arquivo de ensaio.
4. Copiar os dados do ensaio.
5. Colar na planilha do *Excel* referente ao ensaio.

O *LTD* salva os dados a cada 30 minutos e, portanto, deve-se abrir os arquivos a cada meia hora e copiá-los para a planilha.

3.3.2.4 Retirada do Cabo e Coleta de Amostras

1. Novamente posicionar as polias (Figura 3.19);
2. Retirar os seguintes instrumentos:
 - Régua de detecção de quebras;
 - Sensores a laser da régua e do ponto 89 mm;
 - Acelerômetros e suas respectivas braçadeiras;
 - Mesa de alinhamento do *shaker*.
3. Reduzir gradativamente a carga de esticamento do cabo, alternando entre o Tirfor e a alavanca.
4. Retirar os grampos de ancoragem. Executar este passo apenas quando o condutor estiver devidamente folgado.
5. Realiza-se então a serragem da seção do cabo onde ocorreram as quebras. Para evitar que os fios de se desenrolem, deve-se utilizar quatro braçadeiras posicionadas a cerca de 100 mm do grampo para cada extremidade. O espaço entre as braçadeiras deve ser o suficiente para permitir a serragem (recomenda-se 40 milímetros). A Figura 3.29 mostra o processo de serragem do cabo.



Figura 3.29. Processo de serragem do cabo.

6. Retira-se o grampo de suspensão somente após a serragem do cabo.
7. O corpo de prova é então armazenado seguindo os passos a seguir:
 - Medição da distância de cada quebra;
 - Remoção dos fios que sofreram falha;
 - Registro do número e da distância da falha para cada fio.

3.4 METODOLOGIA DE ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA FÓRMULA P-S

Através da fórmula de Poffenberger-Swart, é calculada a amplitude de vibração a ser utilizada no ensaio para uma dada tensão nominal. Pode-se então comparar os valores calculados com os dados obtidos pela extensometria para validação dessa fórmula.

3.4.1 Metodologia

Os extensômetros são colados na região do UPC (Figura 2.16), onde ocorrem os maiores níveis de tensão. Através de ensaios dinâmicos, serão obtidas as tensões nominais para a comparação com os valores calculados pela fórmula de *P-S*. Uma explicação detalhada do princípio de funcionamento dos extensômetros encontra-se na seção 2.3.

Para cada corpo de prova e valor de H/w , são realizados ensaios dinâmicos antes do levantamento da curva *S-N*. Assim, após o esticamento do cabo e instalação dos instrumentos de medição, observados nos itens 3.3.2.1 e 3.3.2.2, serão colados três extensômetros, conforme é descrito no item 3.4.2, no ponto de restrição do movimento (UPC) como visto na Figura 2.24.

Para cada condutor são feitos três ensaios dinâmicos com frequências próximas da frequência natural do condutor, geralmente entre 20 e 30 Hz, as quais serão obtidas através da varredura feita pelo software *Shaker Control*. O registro dos dados é feito somente após o período transiente de oscilação

do condutor. A frequência de aquisição dos dados é de 100 Hz, com uma duração de 30 segundos por experimento, o qual gera aproximadamente 3000 pontos. Após o ensaio, é feita a média dos valores medidos pelos três extensômetros. Como são realizados três ensaios para cada corpo de prova, faz-se novamente uma média e o resultado será comparado com o calculado por *P-S*. A Tabela 3.5 mostra os valores adotados para realização dos ensaios dinâmicos.

Tabela 3.5. Parâmetros do ensaio dinâmico.

Ensaio Dinâmico						
CAL-900						
H/w [m]	Amplitude de Deslocamento (Yb) [mm]			Frequência de Aquisição [Hz]	Resistência do extensômetro [Ω]	Quantidade de ensaios por cabo
	23,7 Mpa	28,22 Mpa	31,35 Mpa			
1820	0,71	0,85	0,94	100	350	3
2144	0,68	0,81	0,90	100	350	3

3.4.2 Procedimento Experimental

O procedimento de colagem dos extensômetros é um processo delicado e deve ser realizado com o devido cuidado. Divide-se o procedimento em 5 etapas: 1) *Preparo da Superfície*; 2) *Verificação da Resistência dos Extensômetros*; 3) *Posicionamento dos Extensômetros*; 4) *Colagem dos Extensômetros*; 5) *Ligação dos Fios no Aquisitor de Dados*.

1) Preparo da Superfície

A superfície do condutor onde serão colados os extensômetros deve ser lixada com uma lixa adequada (recomenda-se uma granulometria entre 80 a 120) em direções longitudinais, como mostrado na Figura 3.30. Não se deve aplicar muita força, pois o objetivo não é reduzir a superfície do fio e sim aumentar a rugosidade superficial para que o fio e o extensômetro tenham uma adesão completa após a colagem.



Figura 3.30. Processo de lixamento.

Após o lixamento da limpeza, deve ser feita uma limpeza primária com um pincel para a retirada de partículas maiores. Em seguida, deve-se limpar cuidadosamente a região com álcool isopropílico como visto na Figura 3.31. Repete-se esta última etapa até que a superfície esteja completamente livre de poeira.



Figura 3.31. a) Álcool isopropílico, b) Limpeza da superfície com álcool e cotonete.

2) Verificação da Resistência do Extensômetro

Deve-se checar com um multímetro a resistência elétrica dos extensômetros e comparar o valor medido com a resistência especificada pelo fabricante. É permitida uma variação de no máximo 5% (Figura 3.32). Caso o extensômetro apresente uma resistência fora do intervalo esperado, deve-se utilizar outro.

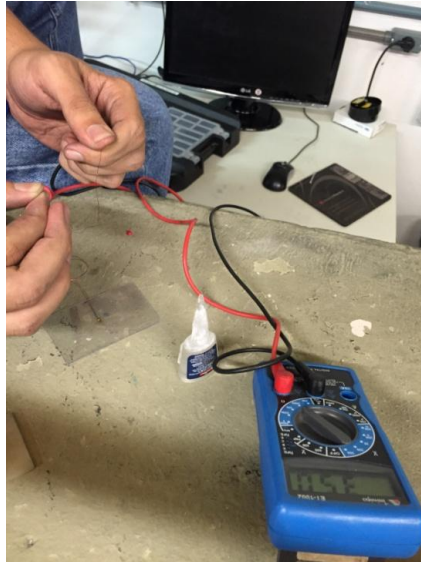


Figura 3.32. Verificação da resistência do extensômetro.

3) Posicionamento do Extensômetro

O exato local em que o extensômetro deverá ser colado é marcado no condutor, conforme a Figura 3.33, com a utilização de um gabarito para determinação do ponto crítico de deformação.



Figura 3.33. Local da colagem do extensômetro.

Após a marcação do local de colagem dos extensômetros, corta-se um pedaço de fita adesiva com tamanho de aproximadamente cinco vezes o comprimento do extensômetro e em seguida, cola-se por cima do mesmo de maneira que o extensômetro fique posicionado no centro da fita (Figura 3.34).

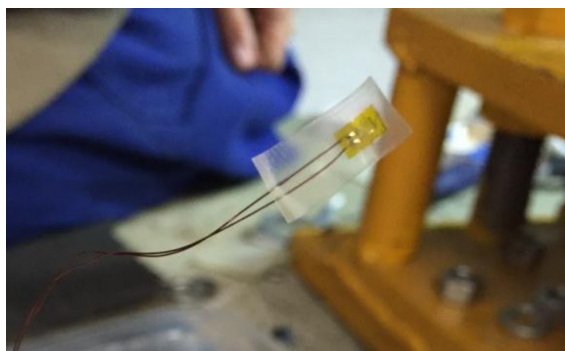


Figura 3.34. Posicionamento do extensômetro na fita adesiva.

4) Colagem do Extensômetro

Aplica-se uma pequena quantidade de cola sobre a região de colagem do extensômetro (Figura 3.35).



Figura 3.35. Aplicação de cola no local de colagem do extensômetro.

Com bastante cuidado, cola-se o extensômetro no condutor e com a ajuda de uma espátula de silicone pressiona-se o dispositivo por aproximadamente 1 minuto para que a cura da cola aconteça (Figura 3.36).



Figura 3.36. Colagem do extensômetro.

Após a fixação, a fita adesiva é retirada e verifica-se o posicionamento e a adesão do extensômetro. Para proteção do mesmo contra impactos mecânicos, corrosão e umidade, recomenda-se a adição de uma camada de resina protetora.

5) Ligação dos Fios no Aquisitor de Dados

Após a colagem do extensômetro deve-se novamente verificar a resistência elétrica do dispositivo. Por fim, os fios do extensômetro são conectados ao aquisitor de dados conforme mostrado na Figura 3.37.

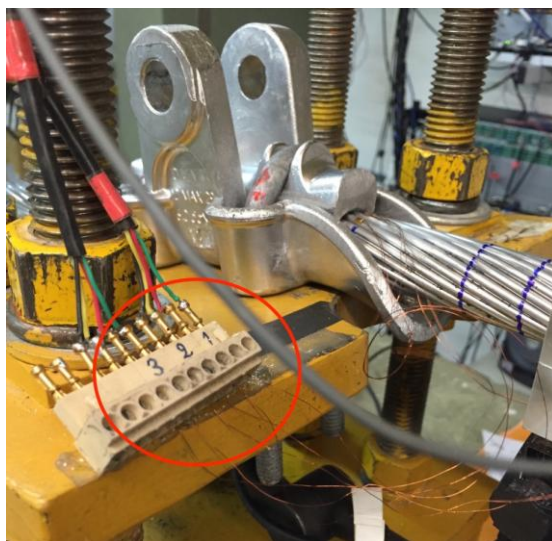


Figura 3.37. Extensômetros conectados no aquisitor de dados.

Terminado o processo de colagem, deve-se balancear e calibrar o extensômetro ao aquisitor de dados por meio do software *AqDados*. O procedimento com o passo a passo encontra-se no Anexo 2.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Este capítulo dedica-se a apresentar e discutir de maneira investigativa os resultados experimentais do estudo.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos dos ensaios dinâmicos e dos ensaios de fadiga (Curva S-N) para o condutor CAL 900 nos dois valores de H/w pré-selecionados.

Serão apresentados neste relatório os dados obtidos dos 18 ensaios concluídos. A análise se inicia com uma comparação dos dados da extensometria e os valores calculados através da Fórmula de Poffenberger-Swart, de modo a validar esta correlação entre a amplitude de vibração e a tensão nominal no UPC dada pela equação. Na etapa seguinte, são apresentadas as curvas S-N obtidas experimentalmente para os valores de H/w . As curvas possibilitam uma análise da influência do parâmetro na durabilidade do condutor, além de uma comparação do comportamento em fadiga do cabo para os diferentes H/w e a curva CSBL.

Os ensaios seguiram a metodologia de forma rigorosa e os resultados da extensometria foram satisfatórios. Entretanto, as curvas S-N se distanciam do comportamento esperado para o condutor CAL 900. Algumas hipóteses foram formuladas para explicar o baixo desempenho em fadiga do cabo. Estas hipóteses são investigadas e discutidas nas seções adiante.

É importante observar que as análises e discussões apresentadas neste estudo são fundamentadas a partir da revisão teórica e da literatura referenciada nos capítulos iniciais.

4.1 Extensometria

Através da equação de Poffenberger-Swart, a amplitude de vibração a ser utilizada no ensaio é calculada para as tensões nominais pré-definidas, como é descrito no capítulo 3. Os ensaios dinâmicos têm a finalidade de validar as tensões calculadas, medindo as tensões reais no UPC e garantindo a confiabilidade dos resultados para a construção das curvas S-N. Os resultados da extensometria se mostraram satisfatórios, apresentando erros dentro da faixa admissível.

4.1.1 Ensaios Dinâmicos para H/w de 1820m

Para um H/w de 1820m, observa-se na Tabela 4.1 que o maior erro obtido nas medições foi da ordem de 10%. Isto significa que as tensões alternadas relacionadas às amplitudes de deslocamento calculadas por P-S se aproximam, de forma aceitável, da média das tensões registradas pelos extensômetros. Para a amplitude de 0,94 mm, o erro é da ordem de 1%.

Tabela 4.1. Resultados do ensaio dinâmico para o H/w de 1820m.

Extensometria (H/w=1820m)					
Ensaio	Amplitude de Deslocamento [mm]	Tensão Alternada de P-S [MPa]	Tensão Medida [MPa]	Média [MPa]	Erro [%]
1	0.71	23.7	24.88	25.95	10%
2			27.35		
3			25.63		
1	0.85	28.22	28.78	29.95	6%
2			31.11		
3			29.97		
1	0.94	31.35	30.76	31.52	1%
2			31.22		
3			32.57		

Verifica-se uma tendência de redução do erro à medida que a amplitude de deslocamento, e consequentemente, a tensão alternada aumentam. Este comportamento é demonstrado no gráfico da Figura 4.1.

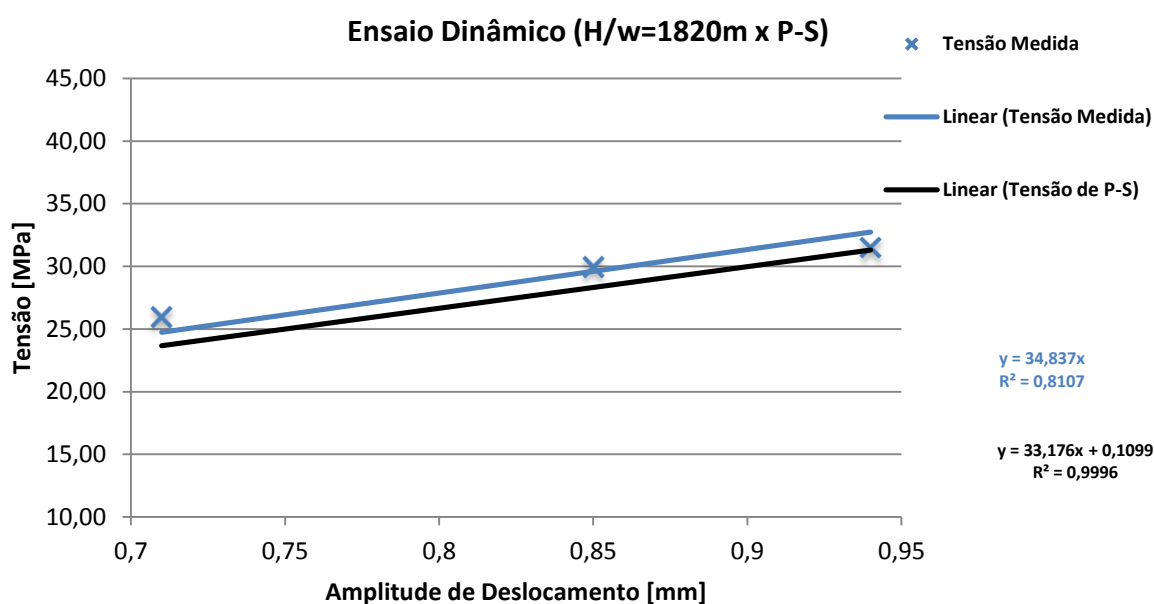


Figura 4.1. Tensão versus amplitude de deslocamento para H/w de 1820.

4.1.2 Ensaios Dinâmicos para H/w de 2144m

Para um H/w de 2144m, observa-se na Tabela 4.2, erro máximo de 10%, o que comprova a confiabilidade da equação empírico-analítica de P-S para o cálculo das amplitudes de deslocamento. É interessante notar, que o comportamento verificado anteriormente para o H/w de 1820m não se repete. Existe uma tendência de aumento do erro e da amplitude de deslocamento simultaneamente, conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.2.

Tabela 4.2. Resultados do ensaio dinâmico para o H/w de 2144m.

Extensometria (H/w=2144m)					
Ensaio	Amplitude de Deslocamento [mm]	Tensão Alternada de P-S [MPa]	Tensão Medida [MPa]	Média [MPa]	Erro [%]
1	0.68	23.7	22.93	23.72	0%
2			24.12		
3			24.11		
1	0.81	28.22	27.7	27.44	3%
2			28.1		
3			26.53		
1	0.9	31.35	28.55	28.35	10%
2			28.01		
3			28.49		

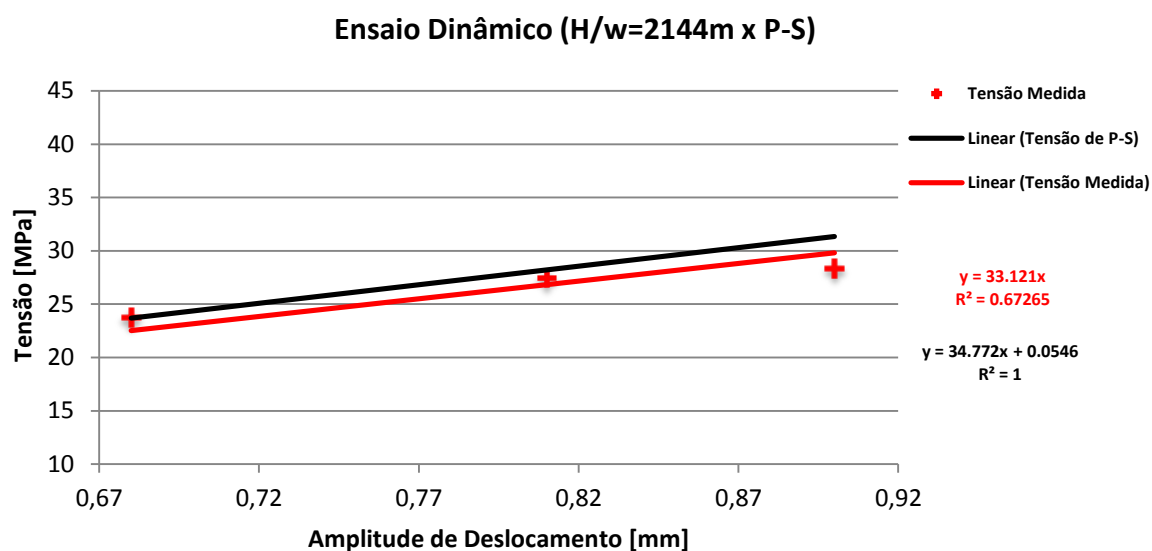


Figura 4.2. Tensão versus amplitude de deslocamento para H/w de 2144m.

Os gráficos das Figura 4.1 e Figura 4.2 apresentam uma comparação entre a curva obtida experimentalmente e a curva descrita pela abordagem analítico-experimental de P-S, onde se observa uma excelente concordância do comportamento das curvas para ambos os valores de H/w .

O gráfico da Figura 4.3 apresenta uma comparação dos resultados dos ensaios dinâmicos para os dois valores de H/w , onde fica evidente o fato de que para maiores valores de H/w , são necessárias menores amplitudes de vibração para gerar as tensões alternadas esperadas. Isto se deve ao consequente aumento da tensão média nos fios do condutor com o aumento de H/w , que resulta em uma maior rigidez do cabo.

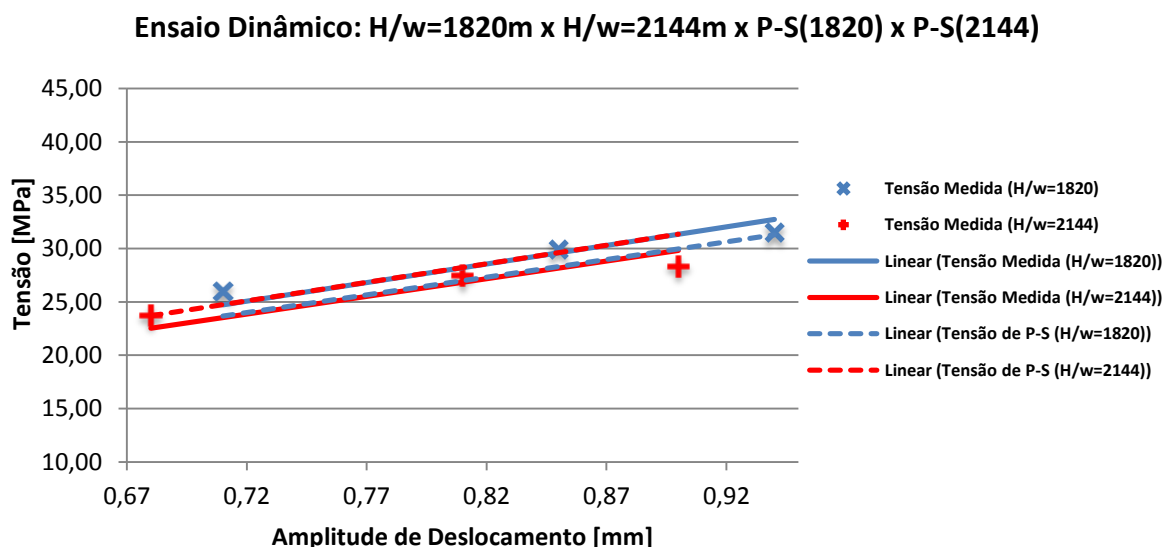


Figura 4.3. Tensão versus Amplitude de Deslocamento referente aos três H/w.

Em síntese, pode-se afirmar com relativa segurança que a equação de Poffenberger-Swart representa de forma adequada a tensão nominal na zona de falha do condutor.

4.2 Curvas S-N

A Tabela 4.3 apresenta os dados obtidos para o levantamento das curvas S-N. Foram realizados 18 ensaios, sendo nove para cada um dos valores de H/w de 1820m e 2144m. Foi definido como critério de parada do ensaio, a quarta quebra de fios do condutor, que corresponde a 10% da quantidade total de fios do CAL 900. Este critério é uma recomendação da CIGRÈ e permite uma comparação das curvas com a CSBL.

Tabela 4.3. Resultados dos ensaios de fadiga para o CAL 900.

Ensaio	H/w [m]	Amplitude de Deslocamento [mm]	Tensão Alternada de P-S [MPa]	Vida [ciclos]	
				4ª Quebra	Média
1	1820	0.71	23.7	1.79E+06	1.50E+06
2				1.21E+06	
3				1.51E+06	
4		0.85	28.22	1.45E+06	1.08E+06
5				1.01E+06	
6				7.89E+05	
7		0.94	31.35	9.55E+05	7.97E+05
8				9.33E+05	
9				5.03E+05	
10	2144	0.68	23.7	1.08E+06	1.29E+06
11				1.50E+06	
12				1.29E+06	
13		0.81	28.22	6.13E+05	9.68E+05
14				1.37E+06	
15				9.21E+05	

16				7.44E+05	
17		0.9	31.35	7.63E+05	7.05E+05
18				6.08E+05	

As curvas S-N obtidas experimentalmente para os H/w 1820m e 2144m são apresentadas na Figura 4.4. Como esperado, a vida do condutor diminui com o aumento da tensão alternada, comportamento típico de um diagrama S-N para cabos condutores de alumínio. Nota-se uma dispersão significativa dos pontos, conforme verificado pelo coeficiente de determinação, que gira em torno de 0,5 em ambos os casos.

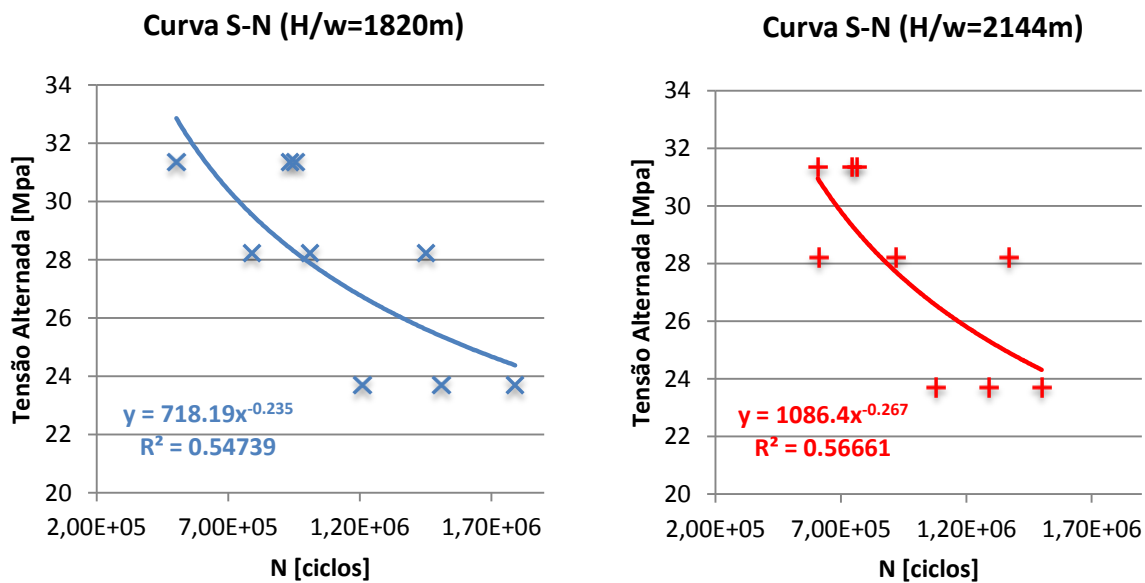


Figura 4.4. Curva S-N para H/w de 1820m e 2144m.

Para um $H/w = 1820m$, observa-se uma vida média correspondente 47% maior com a diminuição da tensão alternada de 31,35 para 23,7 MPa, respectivamente, os valores máximo e mínimo de tensão adotados nos ensaios. Utilizando um H/w de 2144m, para a mesma redução da tensão alternada, verifica-se uma vida 45% maior. Pode-se inferir desta verificação, que para os dois valores de H/w , a vida varia de forma muito similar com a alteração da amplitude de deslocamento.

A Figura 4.5 apresenta o diagrama do comportamento vida-tensão alternada, comparando as curvas de ambos os valores do parâmetro H/w . Com o aumento da carga de esticamento em 15%, houve uma redução da vida média do condutor de quase 12% para o maior valor de tensão alternada. Tal comportamento, aparentemente, sugere que em regiões com regimes de vento severos, a utilização de maiores H/w é possivelmente uma alternativa vantajosa, visto que um condutor mais tracionado permite o emprego de torres de sustentação mais baixas e vãos livres com menores flechas. Entretanto, nota-se que as curvas de tendência se distanciam à medida que a tensão diminui, indicando maior relevância do efeito da variação do parâmetro em regiões de ventos mais amenos.

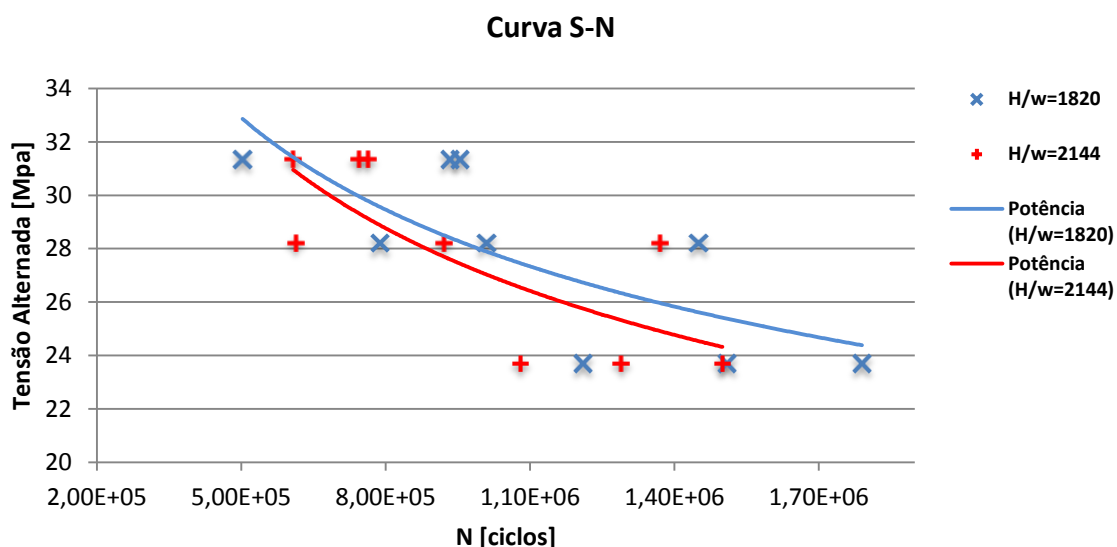


Figura 4.5. Curva S-N para os dois H/w.

4.2.1 Comparação com a CSBL

A *Cigrè Safe Border Line* (CSBL) configura um padrão de referência para análise do comportamento em fadiga de cabos condutores. A Figura 4.6 traz uma comparação da CSBL com as curvas S-N do CAL 900 para os dois parâmetros H/w .

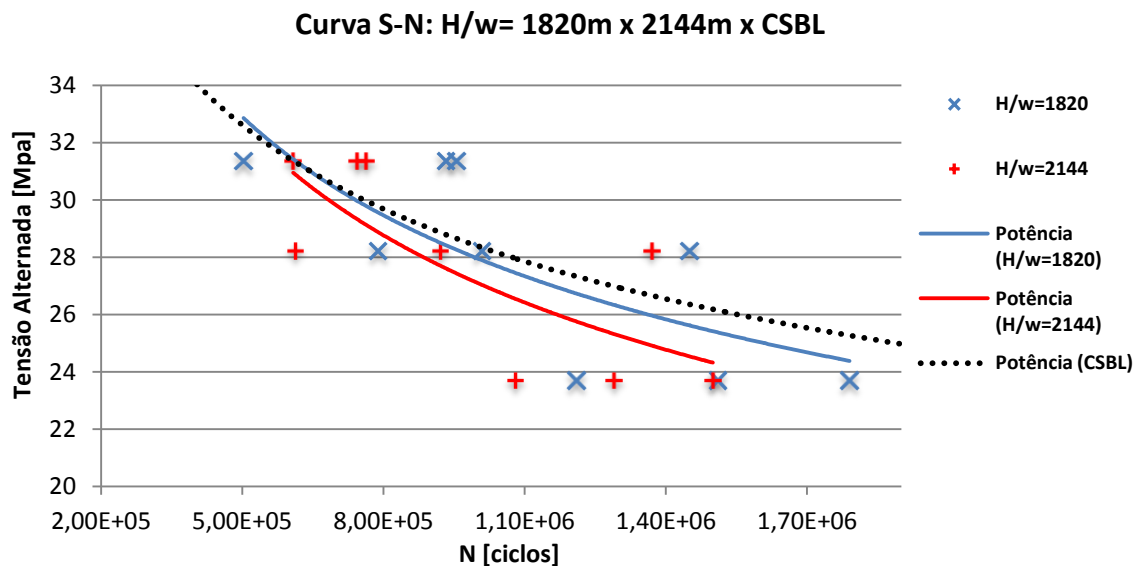


Figura 4.6. Curva S-N para H/w de 1820m, 2144m e a CSBL

Observa-se um comportamento fora do esperado, visto que as curvas se encontram abaixo da CSBL, à qual representa uma referência bastante conservativa que foi proposta como limite inferior de resistência à fadiga para projetos de condutores. Este comportamento pode ser visualizado também no diagrama da Figura 4.7, onde é plotada a razão entre as tensões alternadas no cabo e na *Safe Border*

Line pela vida. Desta forma, a partir de aproximadamente 1 milhão de ciclos, têm-se uma razão menor que um, indicando que as curvas se encontram abaixo da CSBL.

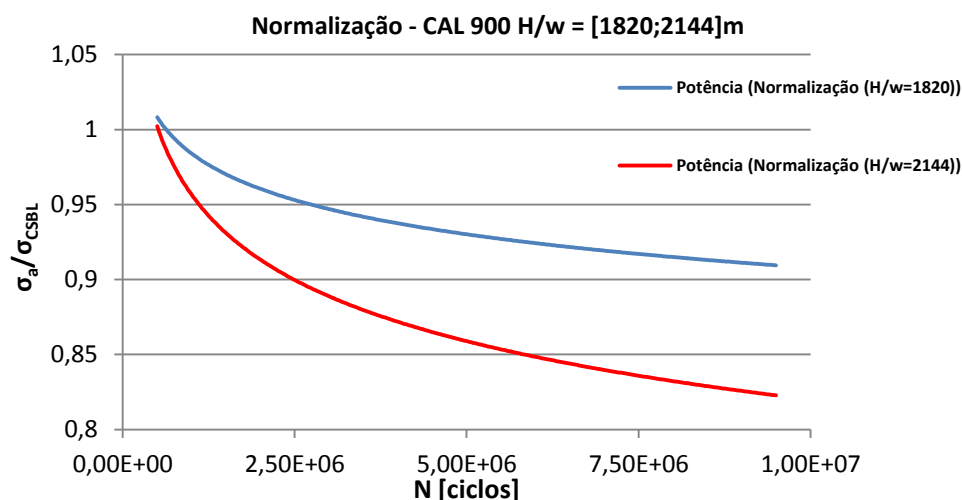


Figura 4.7. Normalização para o CAL 900 com H/w de 1820 e 2144.

Uma hipótese para o comportamento anômalo da curva S-N do CAL 900, é de que a bitola do condutor se aproxima da bitola máxima suportada pelo grampo de suspensão utilizado (29mm), o que poderia afetar a durabilidade do cabo. Esta hipótese surge com a observação de que os ensaios realizados paralelamente com um condutor CAL 1055, de mesma liga e maior folga relativa cabo-grampo, apresentam resultados satisfatórios. Contudo, uma comparação dos dois cabos não seria coerente, visto que ambos utilizam grampos de dimensões diferentes.

Uma alternativa interessante é a comparação, em um mesmo H/w , do CAL 900 com o condutor Tern, também ensaiado no LabCabos. O condutor possui uma bitola similar (27,03mm) e utiliza o mesmo grampo (Tabela 3.2), configurando uma folga próxima. Todavia, o Tern é fabricado em alumínio 1350, enquanto o CAL 900 apresenta a liga AL6201. Desta forma, para uma comparação mais abrangente, foram também analisados dados do estudo de Fadel (2010) para o condutor Ibis, que também apresenta a liga 1350 e um diâmetro consideravelmente menor (19,88mm) para o mesmo grampo de suspensão. As propriedades dos cabos utilizados são descritas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Resultados dos ensaios de fadiga para o CAL 900.

Propriedade	CAL 900	Tern	IBIS
Carga de Ruptura (kgf)	13421	10010	7394
Peso Nominal (kgf/m)	1,252	1,339	0,813
Liga de Alumínio Utilizada no Cabo	6201	1350	1350
Densidade da Liga de Alumínio (kgf/m ³)	2690	2703	2705
Diâmetro Nominal (mm)	27,74	27,03	19,88
Número de Fios	37	45/7	26/7

Verifica-se na Figura 4.8 o comportamento das curvas S-N para os três condutores sobre um H/w de 1820m. As curvas para o Tern e para o Ibis se posicionam acima da CSBL, como esperado. Inicialmente, comparando as curvas do CAL 900 e do Tern, nota-se uma discrepância considerável na resistência à fadiga, apesar da folga cabo-grampo bastante similar, o que em um primeiro momento pode indicar que este fator não possui influência direta na vida do condutor. Entretanto, a comparação entre o Ibis e o Tern, que possuem mesma liga, reforça a hipótese da influência da folga do grampo na durabilidade. É importante ressaltar que uma análise mais detalhada é necessária para verificar esta hipótese.

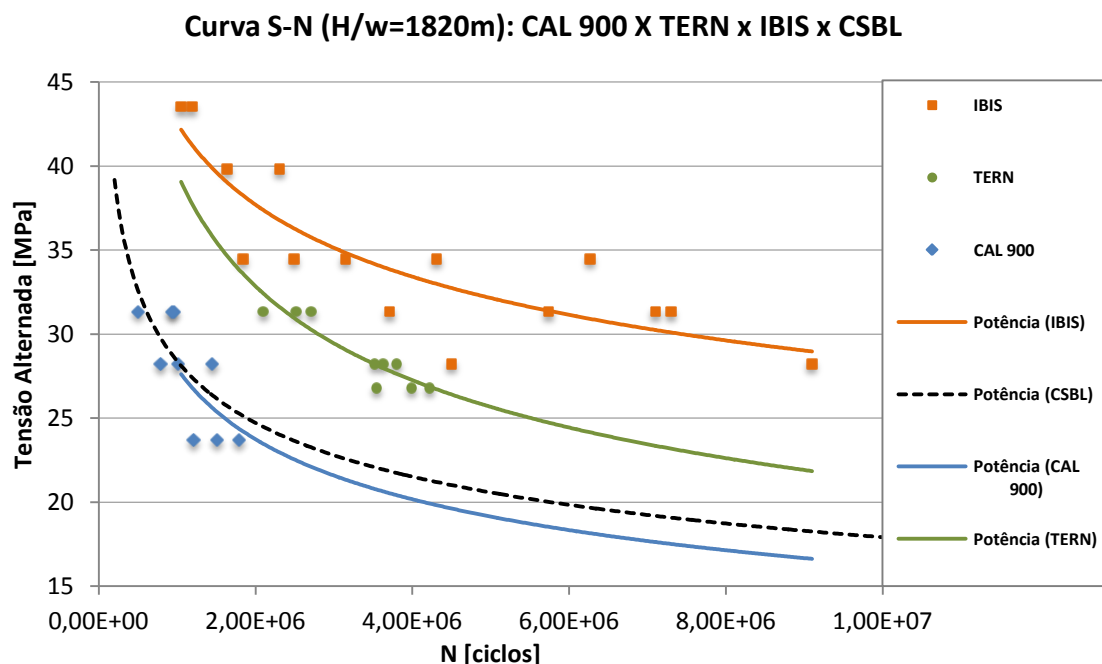


Figura 4.8. Comparação Ibis, Tern, CAL 900 para um H/w de 1820m.

Vale ressaltar também da Figura 4.8, que o comportamento das curvas para os três cabos, sujeitos ao mesmo H/w , não corresponde ao esperado teoricamente. Como mencionado no tópico 2.2.5, diferentes tipos de condutor apresentarão os mesmos valores para resistência à fadiga quando submetidos ao mesmo H/w . Na prática, a utilização do parâmetro em foco no CAL 900 como referência de projeto pode implicar, dependendo do condutor a ser empregado, em projetos superdimensionados. Em outras palavras, a curva do CAL 900 representa uma referência extremamente conservativa para o projeto de linhas de transmissão com os condutores Tern e Ibis, visto que ambos possuem uma durabilidade significativamente maior sob o mesmo H/w .

Uma terceira hipótese, de que a amostra de CAL 900 utilizada nos ensaios apresenta baixa qualidade, surge a partir de uma investigação de ensaios realizados anteriormente para o CAL 900. O estudo de Araújo *et al* (2013), conduzido também no LabCabos, apresenta dados de uma amostra distinta do mesmo condutor avaliado para um H/w de 1820m.

A Figura 4.9 apresenta uma comparação entre os dois conjuntos de dados, demonstrando um comportamento consideravelmente discrepante. A curva S-N do CAL 900 ensaiado anteriormente se

localiza acima da CSBL e para uma vida de 1,29E6 ciclos, a resistência à fadiga é 25% maior. Espera-se que condutores iguais sujeitos a um mesmo valor de H/w apresentem um comportamento similar e, ainda que existam erros experimentais inerentes ao processo de ensaio, uma discrepância nesta ordem de grandeza é significativa. Assim, o comportamento das curvas na Figura 4.9 sugere uma não conformidade das amostras de CAL 900 avaliadas neste estudo com o condutor ensaiado em Araújo *et al* (2013), o que implica a necessidade de estudos mais detalhados sobre possíveis defeitos de fabricação da amostra.

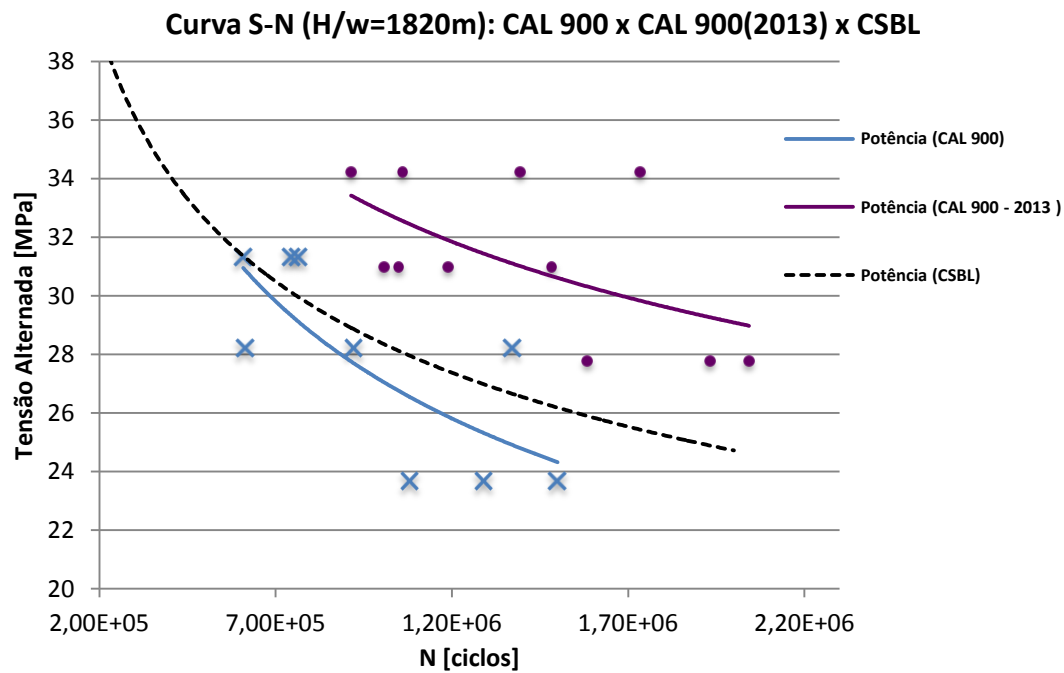


Figura 4.9. Comparação entre o CAL 900 utilizado neste estudo e a amostra de Araújo *et al* (2013).

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e perspectivas de trabalhos futuros.

O presente trabalho lança as bases teóricas e práticas para o estudo do fenômeno de fadiga em cabos condutores CAL 900 com foco no critério de projeto H/w . Foi realizada uma revisão cuidadosa dos conceitos de relevância para o estudo do fenômeno a partir da literatura, possibilitando assim a análise e investigação dos resultados obtidos. Desta forma, as seguintes conclusões podem ser deduzidas:

- O estudo observou a validade da equação empírico-analítica de Poffenberger-Swart através dos ensaios dinâmicos. Os resultados experimentais apresentam um alto nível de concordância com os valores calculados através da fórmula, com um erro de até 10%. Conclui-se que Poffenberger-Swart apresenta boa confiabilidade no cálculo das amplitudes de deslocamento dos ensaios de fadiga.
- Para os dois valores de H/w abordados neste trabalho, a vida média varia de forma similar com a alteração da amplitude de deslocamento. Para uma diminuição de 31,35 MPa para 23,7 MPa, limites máximo e mínimo de tensão alternada pré-definidos para os ensaios, houve um aumento da vida em torno de 46% para ambos os valores de H/w .
- O aumento da carga de esticamento em 15% (H/w de 1820m para 2144m) acarretou uma redução muito pequena de quase 12% na vida do condutor para o valor máximo de tensão alternada. Este comportamento sugere que para valores de tensão alternada mais elevados, a influência do H/w na durabilidade do condutor é menos significativa. Entretanto, à medida que as amplitudes de deslocamento diminuem, o parâmetro apresenta maior influência no comportamento da vida em fadiga do cabo.
- A comparação das curvas S-N com a *Cigrè Safety Border Line* demonstra uma resistência em fadiga para o condutor CAL 900 consideravelmente baixa. Esta constatação levou a uma investigação sobre possíveis fatores de influência neste comportamento anômalo.
- Descarta-se a ocorrência de erros experimentais como uma das causas do comportamento peculiar das curvas S-N, dado que a metodologia de ensaios é consistente, tendo sido validada para diferentes condutores no LabCabos/UnB, e foi seguida rigorosamente nos ensaios referentes a este estudo.
- Uma comparação entre os cabos CAL 900, Tern e Ibis demonstra que o parâmetro H/w não segue o padrão previsto na literatura, segundo o qual, para um mesmo H/w , diferentes classes de condutores apresentam a mesma resistência à fadiga.

- Embora não haja dados suficientes para permitir afirmações cabais em relação aos fatores causadores do comportamento anormal da amostra de CAL 900 utilizada neste estudo, a investigação preliminar aponta indícios da influência da folga cabo-grampo de suspensão na durabilidade do condutor.
- A análise comparativa dos dados de uma amostra de CAL 900 retirados da literatura demonstra um comportamento significativamente distinto da amostra utilizada para este estudo. Foi verificada para a amostra retirada da literatura uma resistência à fadiga 25% maior para uma vida de $1,29E06$ ciclos em um H/w de 1820m. Esta comparação indica uma possível má qualidade da amostra avaliada neste trabalho. No entanto, para uma confirmação desta hipótese é necessária uma investigação mais aprofundada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andolfato, R. P., Camacho, J. S., Brito, G. A. de. (2004), “Extensometria Básica.” Ilha Soleira. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural-Universidade Estadual de São Paulo.
- Araújo, J. A.; Fadel, A. A.; Ferreira, J. L. A.; Henriques, A. M. D.; Araújo, M. C. A.; Watanabe, L.; Takai, M. N. (2013). Avaliação comparativa da resistência à fadiga de cabos CAA e CAL.. In: XXII SNPTEE Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 2013, Brasília. XXII SNPTEE Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica, 2013.
- Azevedo, C.R.F., Henriques, A.M.D., Pulino Filho, A.R., Ferreira, J.L.A. and Araújo, J.A. (2009), “Fretting fatigue in overhead conductors: Rig design and failure analysis of a Grosbeak aluminium cable steel reinforced conductor”. Engineering Failure Analysis 16, (2009), pp. 136–151.
- Barrett, J.S. and Motlis, Y. (2001), “Allowable Tension Levels for Overhead-Line Conductors”. IEEE Proc - Gener Transm Distrib Vol 148 No 1, January.
- Bellorio, M. B., (2009) “Revisão sobre critérios de fadiga para cabos condutores de energia e uso de metodologia para estimativa de sua vida remanescente”, Publicação ENM.DM- , Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.
- Branco C. M., Fernandes A. A., Castro, M.S. T. (1986), “Fadiga de Estruturas Soldadas”, Ed. Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- CIGRE ,WG 11 SC B2 (2006), “Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems Update of Present Knowledge”, Jan.
- CIGRE SC22-WG04 (1985), “Guide for Endurance Tests of Conductors Inside Clamps”, Electra, No 100, pp. 77-86, May.
- CIGRE WG 04 SC 22 – 02 (1979), “Recommendations for the Evaluation of the Lifetime of Transmission Line Conductors”. ELECTRA 63. March.
- CIGRE, TF B2.11.04 (2005), “Overhead Conductor Safe Design Tension with Respect to Aeolian Vibrations”, June.
- CIGRE, WG B2.30 (2010), “Engineering Guidelines Relating to Fatigue Endurance Capability of Conductor/Clamp Systems”, October.
- Claren, R. (1978), “The response of overhead line conductors to vortex shedding under laminar and turbulent air flow”. Presented to CIGRÈ.
- Davim , J. P., Magalhães, A. G. (2004), “Ensaio Mecânicos e Tecnológicos”. Publindústria. Porto.
- Doca, T. C. R. (2006), “Extensometria de um Teste de Fadiga em Cabos Condutores de Energia”, Relatório Final do Trabalho de Iniciação Científica, ENM-UnB, Brasília, DF, 30p.

- Dowling, Norman E. (1999), “Mechanical Behaviour of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue”, Prentice Hall, Second Ed., New Jersey - EUA.
- Duggan, T. V., Byrne J. (1977), “Fatigue as a Design Criterion”, Macmillan Press Ltd.
- EPE (2015), Balanço Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: 62 p. :18 il.; 14,8 cm.
- EPRI (1979), “Transmission Line Reference Book: The Orange Book”. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA.
- Fadel, A. A. (2010), “Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS sobre a Resistência em Fadiga do Condutor IBIS (CAA 397, 5 MCM)”. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.TD-005/2010, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p.
- Fricke Jr., W. G., Rawlins, C. B. (1968), “Importance of Fretting in Vibration Fatigue of Stranded Conductors”, IEEE Transactions Paper, Vol. PAS-87, N° 6, Jun., pp.1381-1384.
- Fuchs, R. D., Almeida, M. T., Labegalini, P. (1992), “Projetos Mecânicos de Linhas Áreas de Transmissão”, 1ª. Ed. Itajubá: Edgard Blücher, 252p.
- Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A. (2000), “Ensaio dos Materiais”, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 247p.
- Henriques, A. M. D. (2006). “Bancada de Ensaio Mecânicos à Fadiga de Cabos Condutores de Energia”. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD 006A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162p.
- IEEE (1966), “Standardization of Conductor Vibration Measurements”, IEEE PAS vol. 85 N°. 1, Trans. 31 TP65-156.
- IEEE, Std 563 (1978), “Guide on Conductor Self Damping Measurements”.
- Klesnil, M., Lukás, P. (1992), “Fatigue of Metallic Materials”. Elsevier: Czechoslovakia, 2ed., cap.1.
- Petroleum, British. BP Statistical Review of World Energy 2015. 2015.
- Poffenberger, J.C., and Swart, R. L. (1965), “Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain”, IEEE Transactions Paper, Vol PAS 84, pp. 281-289
- Preston, B., McGill, A., Ramey, G. E., (1986), “Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue”, Journal of Energy Engineering, vol. 112, no 3, pp. 168-183
- Resenha Energética Brasileira (2015), Ministério de Minas e Energia, jun., Brasília, DF.
- Rosa, A. A.; Monetti J. and Siter, R. B. (1974), - “Overhead Line Vibration and Inspection Techniques”; trabalho apresentado no IEE Laticon, São Paulo.

- Stockbridge, G. H. (1925), "Overcoming vibration in transmission cables", *Elec. World*, 86, (26), 1304, pp. 90-132.
- Zetterholm, O. D. (1960), "Report on the Work of the International CIGRÉ. SC, 110.6: Bare Conductors and Mechanical Calculation. Of Overhead Lines"
- Zhou, Z. R., Goudreau, S., Cardou, A., & Fiset, M., (1995). "Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending fatigue evaluation", *Wear*, 181-183, 531-536.

ANEXO A: Manuseio Do Software De Controle

O seguinte procedimento foi retirado de um relatório do LabCabos de autoria de Renato E. R. Vieira.

1. Abrir o software "shaker control"

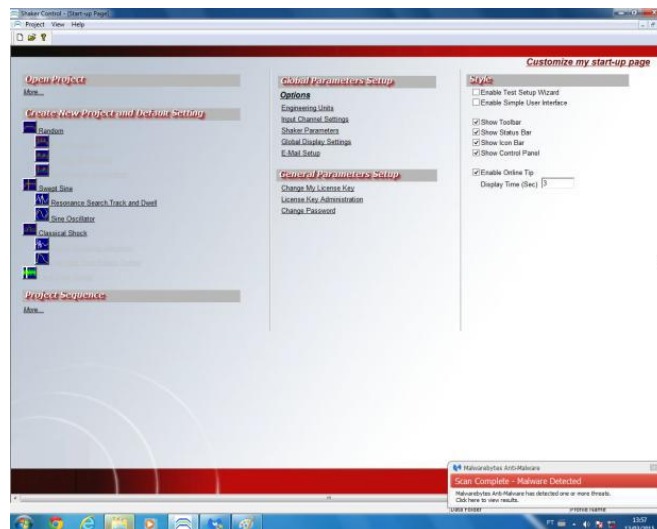
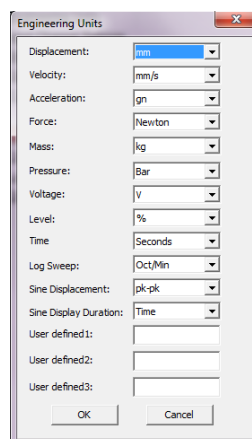


Figura A.5.1 Janela Inicial do software.

2. Na opção "Global Parameters Setup":
 - I. Definir as unidades das variáveis: "Engineering Units"



FiguraA.5.2. Definição das unidades.

- II. Definir os parâmetros do shaker: "Global Shaker Parameters"

Deve-se consultar a tabela de parâmetros do modelo do shaker. Caso não esteja no laboratório, é possível acessar no site do fabricante.

[illegible]

Figura A.5.3. Tabela de parâmetros do shaker.

Global Shaker Parameters

Shaker name:

Random / LTH Settings

Force RMS (Newton) Max. Positive Displacement (mm)

Acceleration RMS (gn) Max. Negative Displacement (mm)

Sine Settings

Force Peak (Newton) Max. Positive Displacement (mm)

Acceleration Peak (gn) Max. Negative Displacement (mm)

Shock Settings

Force Peak (Newton) Max. Positive Displacement (mm)

Acceleration Peak (gn) Max. Negative Displacement (mm)

General Settings

Max. Drive Voltage (peak) Min. Drive Frequency (Hz)

Max. Velocity (mm/s) Max. Drive Frequency

Shaker Orientation

Armature

Diameter (mm)

Mass (kg)

Assume Noisy Measurement? ☐

Figura A.5.4. Janela global shaker parameters.

- III. Abrir um projeto e configurar os parâmetros de acordo com a ordem dos ícones na parte esquerda da tela.
- IV. Verificar se os parâmetros do shaker estão de acordo clicando no primeiro ícone "Shaker".

Shaker Parameters

Shaker Model: From Loaded Project

Shaker Settings

Force Peak (Newton)	4600
Acceleration Peak (gn)	94
Max. Velocity (m/s)	0.81
Max. Positive Displacement (mm)	12.7
Max. Negative Displacement (mm)	12.7
Shaker Orientation	Vertical
Max. Drive Voltage (Volts)	2.5
Min. Drive Frequency (Hz)	5
Max. Drive Frequency (Hz)	3000

☐ Assume Noisy Measurement?

☐ Use global settings

You can edit your shaker parameters using the shaker library. Shaker Library

NOTE: The default values in the Shaker Library are meant as a reference only. Actual values will depend on your test setup.

OK Cancel

Figura A.5.5. Parâmetros do shaker.

V. Configurar as leituras de entradas analógicas "Channel".

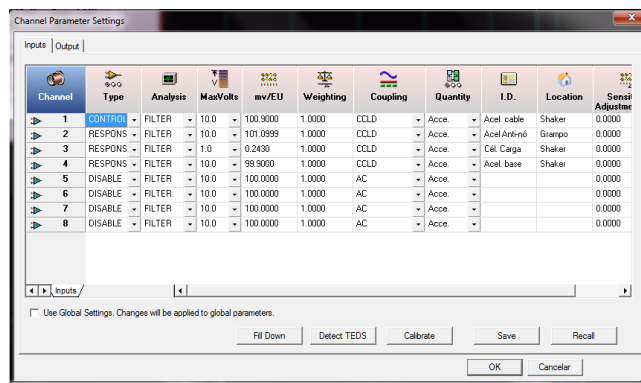


Figura A.5.6. Channel.

- Type: Seleciona os sinais que controlam e monitoram o ensaio.
- mv/EU: Os diferentes tipos de acelerômetros e células de carga possuem diferentes calibrações, sendo necessário informar ao software o valor de cada modelo (procurar a caixa do receptor utilizado através do Serial Number). Para os acelerômetros, existe um papel colado na sala de controle com essa informação.
- I.D.: O nome escolhido para cada receptor será o título do gráfico gerado na janela principal durante o ensaio.



Figura A.5.7. Serial number de um acelerômetro.

VI. Configurar os controles do ensaio "Control".

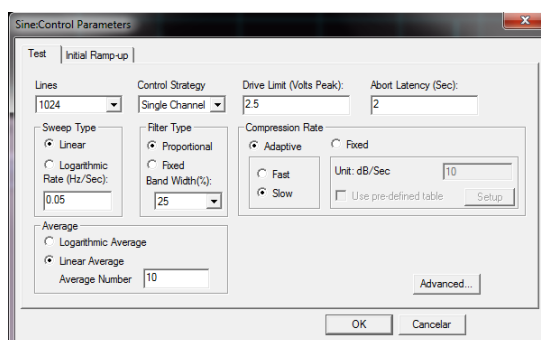


Figura A.5.8. Control.

- VII. Configurar o deslocamento do acelerômetro de controle e a frequência em que o ensaio será rodado na janela "Profile".

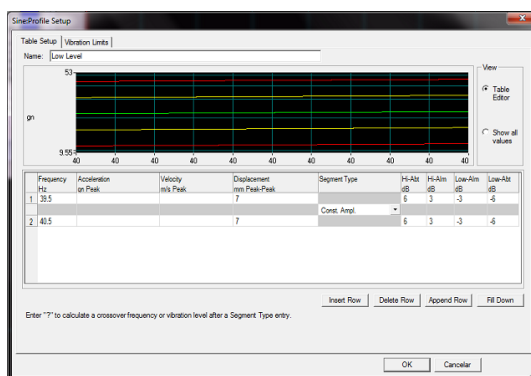


Figura A.5.9. Profile.

- VIII. No ícone "Schedule" o tipo de ensaio é selecionado. Para realizar uma varredura, seleciona-se a opção "Sweep" já o ensaio de fadiga, é feito por meio da opção "Dwell". Nessa janela fixa-se a duração do ensaio e as frequências de trabalho.

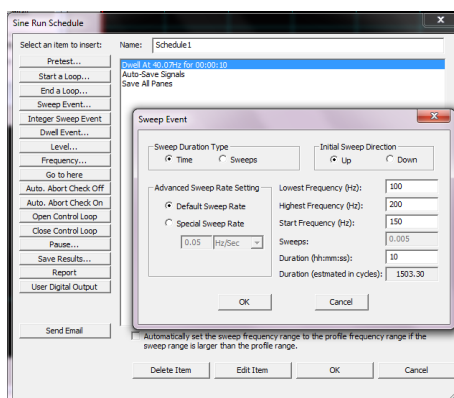


Figura A.5.10. Sweep.

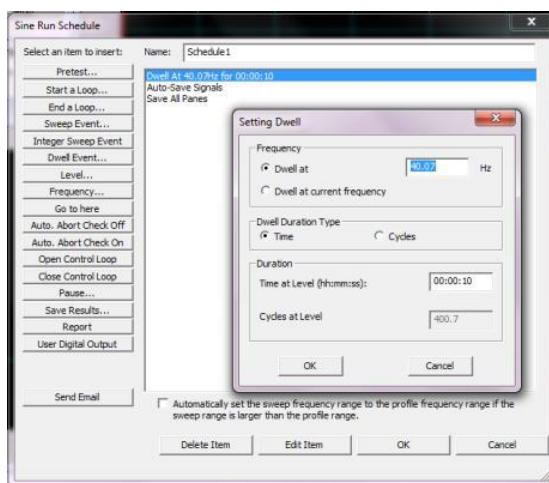


Figura A.5.11. Dwell.

- IX. "Transmiss": Nesse ícone, escolhe-se os sinais que serão combinados para análise posterior. Os ícones "Response" e "Excitation" referem-se à uma fração onde os sinais devem ser escolhidos de acordo com a saída proposta no ensaio.

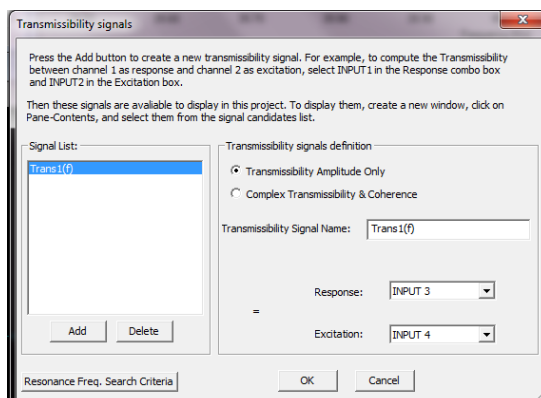


Figura A.5.12. Transmissibility.

- X. Por fim, na janela inicial ao clicar com o botão direito no gráfico, a opção "contents" permite escolher os sinais que serão visualizados.

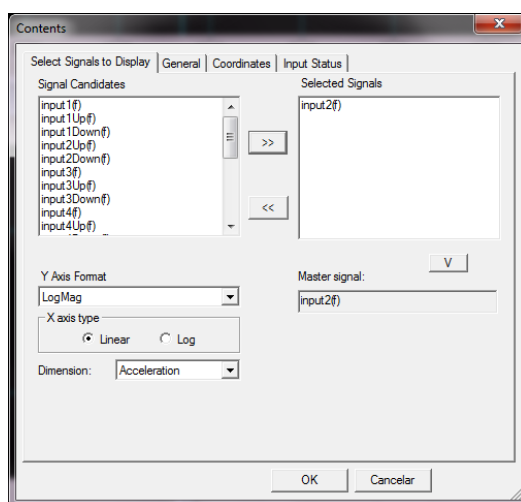


Figura A.5.13. Contents.

ANEXO B: Calibração e Balanceamento do Extensômetro

O seguinte procedimento foi retirado de um relatório do LabCabos de autoria de Renato E. R. Vieira.

Abrir o AqDados e selecionar a opção "configuração do driver de aquisição"

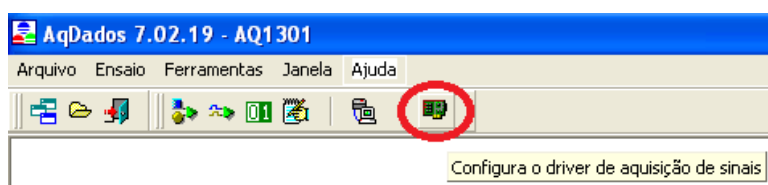


Figura B.5.14. Software AqDados.

Na janela de Configuração do Driver:

- Barramento de expansão: ADS2000.
- Driver de Aquisição: Deve-se escolher uma das opções dadas pelo programa para encontrar o driver utilizado. Geralmente a opção utilizada é "AC2122-VB: Controlador Ethernet para o ADS2000".
- Clicar em configurar.

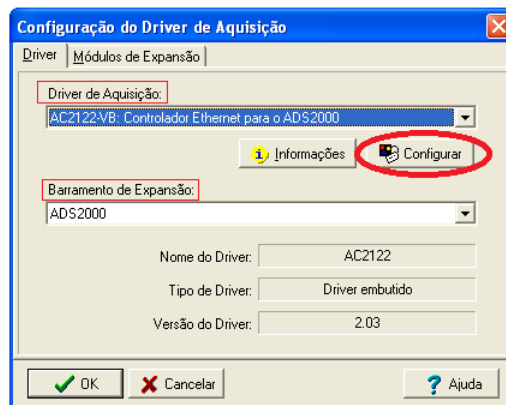


Figura B.5.15. Configuração do driver de aquisição.

- O endereço de IP deve ser modificado para 192.168.1.1 (o ultimo número do endereço IP pode variar para 2 ou 3 dependendo do ADS utilizado).

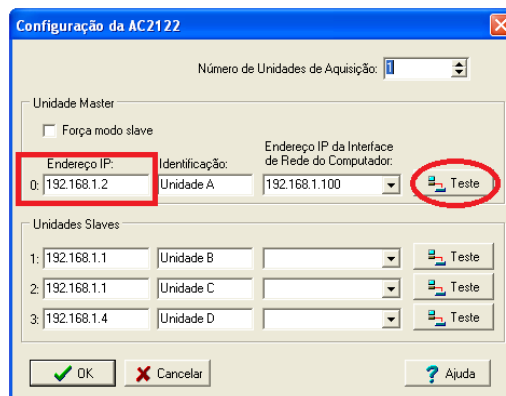


Figura B.5.16. Comunicação entre hardware e software.

- Clicar em teste. Deve aparecer uma caixa informando que o AC2122 respondeu, caso contrário o endereço de IP deve ser modificado.

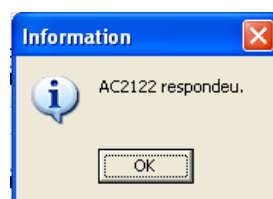


Figura B.5.17. Comunicação feita com sucesso.

Na janela Módulos de expansão:

- Selecionar o módulo e o modelo de driver utilizado. Geralmente marca-se as caixas correspondentes à "Módulo 0" e "Módulo 1".
- Módulo 0: Modelo AI-2164 16 entradas
- Módulo 1: Modelo AI-2164 32 entradas

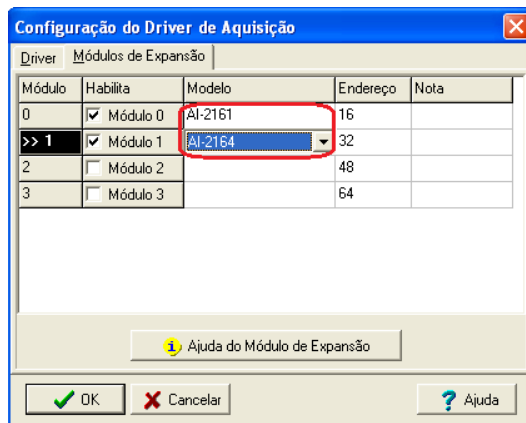


Figura B.5.18. Caracterização do modelo do ADS utilizado.

- Obs: As aba endereço refere-se à quantidade de entradas que o ADS utilizado possui. Com relação ao modelo, pode acontecer de diferir do escolhido neste manual, caso isso ocorra o programa irá informar no momento de calibração do extensômetro (ilustração abaixo), bastando voltar às configurações e trocar pelo modelo correto.

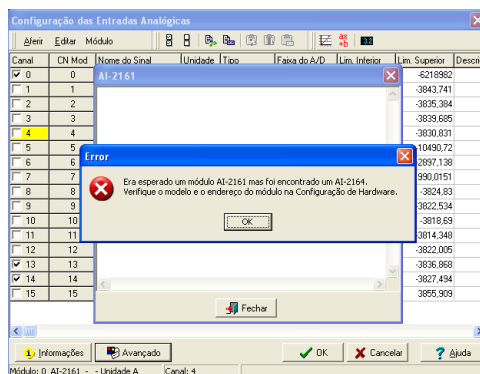


Figura B.5.19. Erro frequente na caracterização do modelo do hardware.

De volta à página inicial do programa, clicar em ensaio e selecionar a opção entradas analógicas.

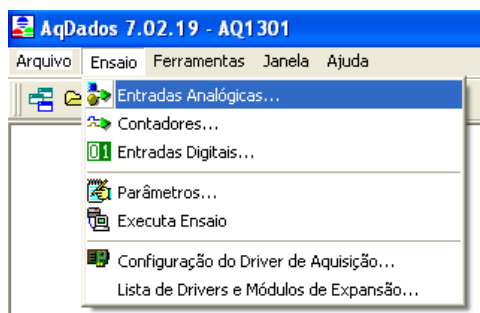


Figura B.5.20. Preparação do ensaio.

Clicar na opção informações.

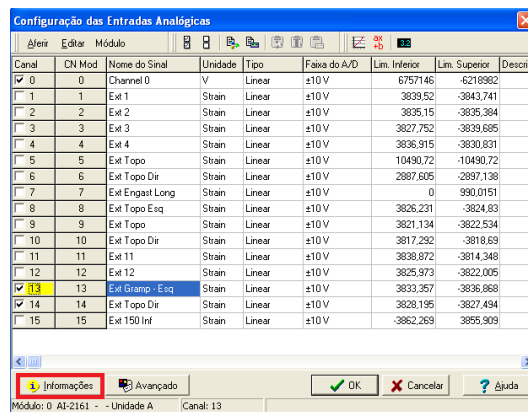


Figura B.5.21. Configuração das entradas analógicas.

- A janela aberta mostra a configuração manual que o ADS deve estar para funcionar corretamente. Deve-se certificar de que esta configuração está correta abrindo o hardware e conferindo com a figura mostrada pelo software.
- O laboratório geralmente utiliza extensômetro de resistência 350 Ω ou 120 Ω na configuração 1/4 de ponte.

Tipo mais utilizado no laboratório

1/4 ponte 120 Ω (2 fios)		1/4 ponte 120 Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
1/4 ponte 120 Ω (3 fios)		1/4 ponte 120 Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
1/4 ponte 350 Ω (2 fios)		1/4 ponte 350 Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
1/4 ponte 350 Ω (3 fios)		1/4 ponte 350 Ω	Ganho sugerido: ≥ 1000 Excitação sugerida: ≤ 5 V
Contato seco		Ganho sugerido: 1	Ganho sugerido: 1
Saída coletor aberto		Ganho sugerido: 1	Ganho sugerido: 1

Configuração manual

Para todas as configurações de entrada apresentadas na tabela acima, os jumpers JB1a (onde n: A a F) devem ficar na posição 1 e os jumpers JB2a devem ficar na posição 1.

Figura B.5.22. Menu de informações.

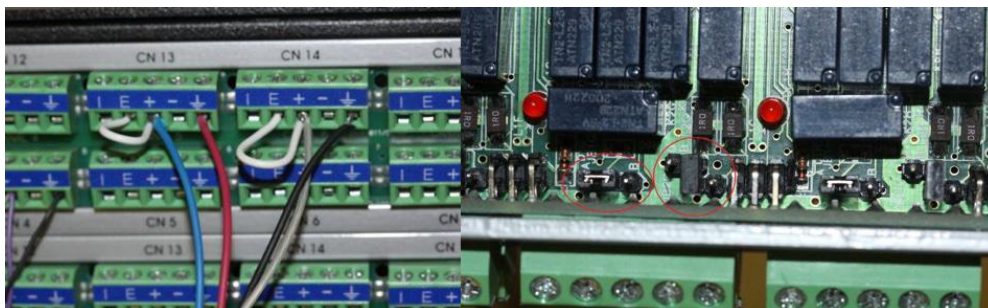


Figura B.5.23. Configuração necessária para leitura dos extensômetros.

- Feitas as configurações necessárias para a comunicação correta entre o ADS e o computador, deve-se agora calibrar o extensômetro. De volta à aba "Configurações das entradas analógicas":
- Marcar as caixas dos canais que estão sendo utilizados e o canal 0.
- Alterar o nome do sinal para identificar o local onde o extensômetro está fixo no cabo (basta clicar 2x).

- Seccionar o tipo de leitura que será feita pelo AqDados. No caso de extensômetro: "Strain" e "Linear". Quando o software permitir, a faixa deve ser modificada para o valor fornecido no menu de informações.
- Clicar na opção Avançado.

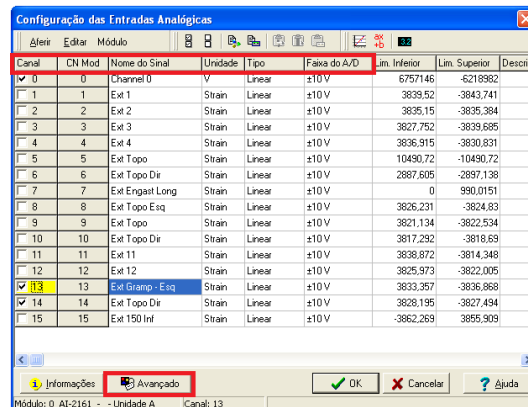


Figura B.5.24. Configuração dos extensômetros.

Na janela de configurações avançadas:

- Marcar as caixas dos canais que estão sendo utilizados e o canal 0
- Escolher o tipo de entrada que o software irá ler, no caso deste manual: 1/4 de ponte
- Selecionar o ganho do sinal, geralmente x1000 pois é o valor sugerido no menu informações para a configuração 1/4 de ponte.
- Escolher o filtro de Passa Baixas, geralmente de 30Hz
- Selecionar a excitação do extensômetro, também sugerida no menu informações: 5V
- Selecionar o RCAL que será utilizado e o respectivo valor do Shunt. O RCAL utilizado depende da faixa de medição que o extensômetro irá ler. Existe uma tabela com os respectivos valores de faixas de medição do RCAL e a fórmula utilizada para o calculo do shunt fixada no AqDados. Para facilitar, uma planilha com o valor do shunt de cada RCAL foi criada no Excel.

Gf	2,08		2 k
Rcal 1	57733		579425 rcall
Rcal 2	190807		120 rg
Rcal 3	578676		
Rgage	350		-103,529
Shunt1	-2897,05		
Shunt2	-880,267		
Shunt3	-290,607		

Figura B.5.25. Planilha Excel com o calculo do Shunt para cada RCAL.

Canal	CN Mod	Nome do Sinal	Unidade	Faixa do A/D	Tipo de Entrada	Ganho	Filtro Passa Baixa	Excitação	Balanco	Reposuo	Reposuo Eng	RCAL	Shunt Cal	Shunt Eng	Lim. Inferior	Lim. Super
0	0	Channel 0	V	±10V					0.0001V	0.0001V			1.0000V		6757146	6219
1	1	Ext 1	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3629.52	-3843
2	2	Ext 2	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3625.1499	-3635
3	3	Ext 3	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3627.752	-3639.6
4	4	Ext 4	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3636.915	-3630.9
5	5	Ext Topo	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		10450.72	-10459
6	6	Ext Topo Di	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		2887.605	-2897.1
7	7	Ext Engast Long	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		0	540.09
8	8	Ext Topo Eng	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3626.231	-3624.9
9	9	Ext Topo	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3621.134	-3622.5
10	10	Ext Topo Di	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3817.292	-3818.6
11	11	Ext 11	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3638.0721	-3614.3
12	12	Ext 12	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3625.0725	-3622.0
13	13	Ext Grapo Eng	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0 RCAL1 na Exc	7.5620V	2897.05	3637.0113	-3631.9
14	14	Ext Topo Di	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0073V	0.0001V		0 RCAL1 na Exc	7.5620V	2897.05	3622.915	-3629.6
15	15	Ext 150 mV	Strain	±10V	1/4 ponte 350	x1000	30Hz	E = 5V	0.0001V	0.0001V		0.0001V na Exc	1.0000V		3862.269	-3895.9

Figura B.5.26. Caracterização do extensometro e da faixa de leitura.

- Uma vez que os dados do software estão de acordo, faz-se então o balanceamento dos canais e a calibração dos extensômetros:

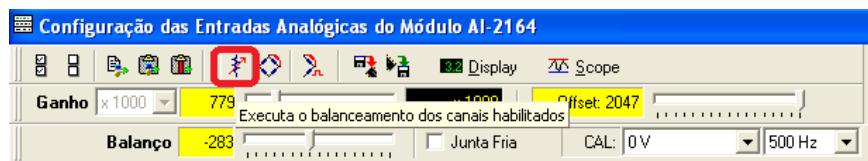


Figura B.5.27. Balanceamento.

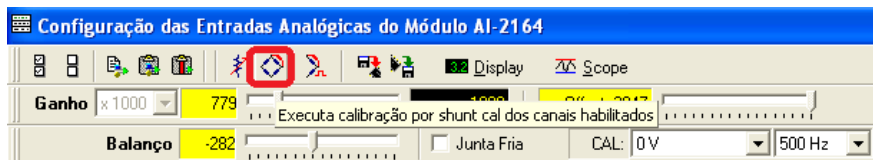


Figura B.5.28. Calibração.

- Ao final da calibração, o software abre uma janela de resposta como a ilustrada abaixo. Caso não exista nenhum erro destacado na parte direita da janela, a extensometria foi realizada com sucesso.

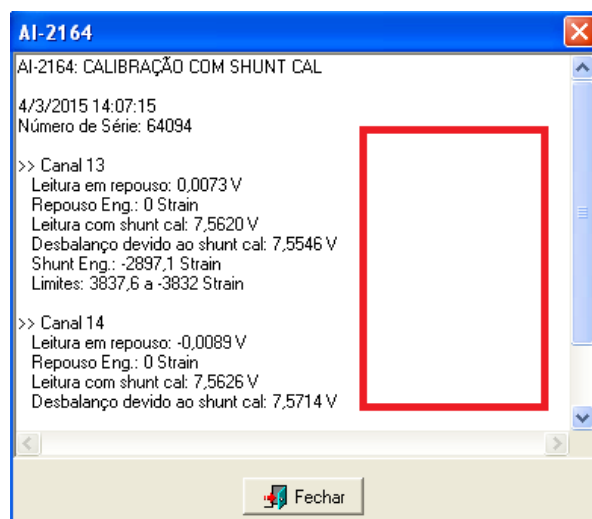


Figura B.5.29. Relatório da extensometria.